

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

ANÁLISE E CORREÇÃO DA SEGURANÇA USANDO ESTABILIDADE
TRANSITÓRIA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA

Maria de Fátima Ribeiro Raia Cabreira

FLORIANÓPOLIS, JULHO-1985

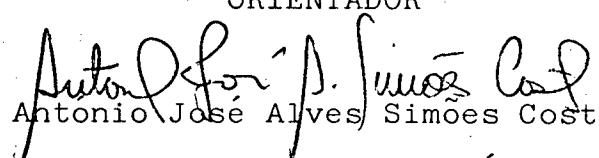
ANÁLISE E CORREÇÃO DA SEGURANÇA USANDO ESTABILIDADE
TRANSITÓRIA

Maria de Fátima Ribeiro Raia Cabreira

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DE MESTRE EM ENGENHARIA. ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA
E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc


ORIENTADOR

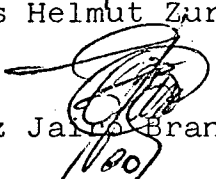

Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.

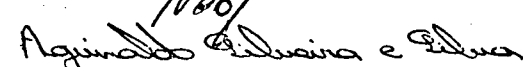
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc


Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.


Prof. Luiz Jaime Branco Machado, Dr.Ing.


Prof. Aginaldo Silveira e Silva, M.Sc.

A Luiz Delfino e Diego,
meu esposo e filho.

A Archimedes, meu pai (in memoriam),
a Maria de Lourdes, minha mãe,
a meus irmãos, cunhados e sobrinhos.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca pela orientação, dedicação e incentivo dados ao longo deste trabalho.

A todos os professores, colegas e funcionários do Centro Tecnológico que, de uma ou outra forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Especialmente a Mirtes Vieira pela colaboração e inestimáveis sugestões. Às amigas Elizabeth Alfaya dos Santos e Rosana Seligman pelo constante apoio e incentivo.

Agradeço aos professores Hans Helmut Zürn, Aguinaldo Silveira e Silva e Luiz Jairo Branco Machado pela ajuda e colaboração no decorrer deste trabalho.

A meu esposo Luiz Delfino, a quem dedico de modo especial este trabalho, agradeço o estímulo, a compreensão e a confiança com que me acompanhou e aguardou o desenvolvimento e término deste trabalho.

Sou grata à Marlei, à Mirtes e ao Luiz pela ajuda na datilografia.

Ao CNPQ e CAPES pelo apoio financeiro.

S U M Á R I O

RESUMO	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	3
CAPÍTULO II - ANÁLISE DA SEGURANÇA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	7
2.1 - Introdução	7
2.2 - Modelo Matemático do Sistema de Potência	7
2.3 - Análise da Estabilidade	8
2.4 - Domínio de Estabilidade	13
2.5 - Ponto de Equilíbrio Pré e Pós-Falta	14
2.6 - Índice de Segurança	19
2.7 - Conclusão	21
CAPÍTULO III - MELHORIA DA SEGURANÇA	23
3.1 - Introdução	23
3.2 - Interpretação do Problema da Melhoria da Segurança	24
3.3 - Obtenção da Restrição de Estabilidade Transitória	27
3.4 - Formulação da Função Objetivo	36
3.5 - Outras Restrições	39
3.6 - Métodos de Solução Primal e Dual	43
3.7 - Algoritmo para a Melhoria da Segurança de um Sistema Sujeito a <u>n</u> Contigências	49
3.8 - Fator de Aceleração	53
3.9 - Conclusão	55

CAPÍTULO IV - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1 - Introdução	57
4.2 - Exemplo 1 - 3 Geradores	57
4.2.1 - Método Primal	60
4.2.2 - Método Dual	65
4.3 - Exemplo 2 - 4 Geradores	65
4.3.1 - Método Primal	68
4.3.2 - Método Dual	70
4.4 - Exemplo 3 - 10 Geradores	71
4.4.1 - Análise de 5 contingências	76
4.4.2 - Análise de 10 contingências	79
4.5 - Fator de Aceleração	84
4.6 - Comentários sobre os Resultados dos Métodos Primal e Dual	85
4.7 - Conclusões e Comentários	88
 CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	 89
5.1 - Conclusões	89
5.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos	91
 APÊNDICE A - MODELO DO SISTEMA	 92
 APÊNDICE B - CÁLCULO DO DOMÍNIO DE ESTABILIDADE	 97
 APÊNDICE C - ALGORITMO PARA CÁLCULO DO EQUILÍBRIO PÓS-DEFEITO.	 101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

RESUMO

Neste trabalho é proposto um algoritmo para a melhoria da segurança em sistemas de potência, considerando-se a análise de estabilidade transitória e contingências do tipo perda de linha e/ou transformador.

A solução do problema da melhoria da segurança consiste, conforme proposto, em determinar as modificações na geração e/ou carga de modo que o ponto de equilíbrio do sistema pertença à interseção de todos os domínios de estabilidade dos pontos de equilíbrio sob contingência.

O algoritmo desenvolvido baseia-se em resultados anteriores e é uma generalização para o caso de várias contingências, de modo que a correção da segurança leve em conta a influência de todas as contingências consideradas.

Em função do aumento das restrições é proposto o uso do problema de programação linear na forma dual.

É introduzido também um fator de aceleração que que melhora a convergência do algoritmo proposto, possibilitando a diminuição do tempo computacional envolvido. São apresentados diversos exemplos que ilustram os resultados obtidos.

ABSTRACT

In this work an algorithm is proposed to improve the security of power systems considering the analysis of transient stability and contingencies of the type of line and/or transformer loss.

The proposed solution of the problem to improve security consists of determining the changes in power generation and/or load such that the equilibrium point of the system belongs to the intersection of all stability domains of the equilibrium points under contingency.

The developed algorithm is based upon previous results, and is a generalization for the case of several contingencies, such that the security correction takes into account the influence of all considered contingencies.

Due to the increase of the number of restrictions the use of the dual form of linear programming is proposed for this problem.

An acceleration factor is also introduced to improve convergence of the proposed algorithm, allowing a reduction in computational time. Several examples are presented to illustrate the results obtained.

C A P Í T U L O I

INTRODUÇÃO

O aumento da dependência do uso da energia elétrica tem conduzido à necessidade de construção de sistemas de capacidade cada vez maior e características de fornecimento da energia com níveis cada vez melhores de confiabilidade e segurança.

Neste sentido e considerando as não linearidades presentes, mesmo nos modelos matemáticos mais simplificados, tem-se procurado levar em conta na análise da segurança a estabilidade transitória, a qual visa essencialmente verificar a manutenção do sincronismo entre os geradores, após a ocorrência de perturbações do tipo curto-circuito, perda de linhas de transmissão e entrada ou saída de cargas ou geradores.

Recentes progressos na aplicação de métodos de determinação de domínios de estabilidade têm permitido a avaliação da segurança, considerando, além da estabilidade do equilíbrio sob defeito, a alcançabilidade do ponto de operação pela trajetória do sistema com parâmetros pós-defeito, determinada pelo estado do sistema no instante em que cessa a perturbação. A situação pós-defeito fica então caracterizada pela configuração do sistema após a retirada de operação do equipamento em defeito ou após a retirada por outras razões.

Do ponto de vista de análise de contingência a utilização de domínios de estabilidade e índices de segurança

associados permite o reconhecimento das contingências críticas para o sistema. A questão que se coloca em seguida, consiste em se determinar quais ações de controle poderiam ser usadas, em relação ao ponto normal de operação, de modo que sob qualquer contingência o sistema admita um equilíbrio estável pós-defeito e este ponto seja alcançável pelas trajetórias do sistema correspondentes a cada situação de defeito.

Estas ações de controle podem ser efetuadas usando-se reforço da transmissão, chaveamento de linhas, redespachos de geração, alívio de carga, uso de transformadores defasadores ou modificação na compensação reativa do sistema.

Tratando-se do problema de sistemas elétricos, o trabalho de [2] é voltado para o problema do despacho com segurança, sob o ponto de vista da estabilidade transitória, o qual faz do uso do segundo método de Liapunov [1,2,3,4], considerando a função energia como função de Liapunov, com a qual determina-se um domínio de estabilidade que é utilizado como indicador de segurança do ponto de vista de operação pós-defeito, usando-se para isto um modelo matemático simplificado [2,4,5,6,10]. Para a melhoria da segurança, considera-se o sistema em sobrecarga se a condição inicial não pertencer ao domínio de estabilidade para o ponto de equilíbrio correspondente a uma determinada contingência. Seguindo a análise adota-se como ação de controle, a realocação de geração e/ou alívio de carga, levada a efeito através da solução de um problema de programação linear que usa um método simplex primal. Tem-se observado que a análise de uma contingência por vez limita o uso do procedimento e que o método de programação linear simplex primal restringe o estudo a sistemas com poucas barras e máquinas, uma vez que para sistemas maiores podem aparecer problemas de instabilidade numérica com o

uso deste método, além de elevado tempo computacional para processamento.

Propõe-se então o desenvolvimento de um algoritmo para a análise e melhoria da segurança, o qual faz análise de várias contingências, levando-se em conta a estabilidade transitória, como em [2], fazendo-se uso de índices de segurança calculados para cada contingência e baseados em domínios de estabilidade. A partir de um nível de segurança especificado e um critério, por exemplo mínimo desvio em relação ao ponto de operação normal, conforme [2], resolve-se uma sequência de problemas de programação linear através do uso do método simplex dual que fornece um redespacho de geração e/ou alívio de carga especificando um novo ponto de operação pertencente à intersecção dos domínios de estabilidade dos pontos de equilíbrio sob defeito e que atende a um nível de segurança especificado. Isto garante a alcançabilidade dos pontos de equilíbrio sob defeito, no caso de ocorrência de contingências associadas. Propõe-se também o uso de um fator de aceleração que acelera o processo de convergência do algoritmo. Trata-se portanto do problema de correção da segurança considerando-se redespacho de geração ou alívio de carga mas preservando a estabilidade transitória.

Assim, no capítulo 2, são apresentados o modelo matemático do sistema considerado, métodos de análise de estabilidade, determinação de domínios de estabilidade, obtidos através do método do politopo [1,2,4], a conceituação e determinação dos pontos de equilíbrio pré e pós falta e conceitos de índices de segurança e estabilidade.

No capítulo 3 apresenta-se uma interpretação do problema de melhoria da segurança, formula-se uma restrição de

estabilidade transitória, conforme [2], a qual define um estado desejado de segurança. Formulam-se também uma função objetivo e outras restrições [2], que serão usadas para solução do problema da segurança, fazendo-se uso da programação linear. Serão mostrados os métodos de programação linear simplex primal e dual. Em seguida será proposto um algoritmo para eliminação de sobrecargas e um fator de aceleração que reduz o tempo computacional.

Exemplos são mostrados no capítulo 4, de modo a ilustrar o algoritmo proposto. Conclusões finais e recomendações estão incluídas no capítulo 5.

C A P Í T U L O I I

ANÁLISE DA SEGURANÇA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 - Introdução

Neste capítulo serão apresentados o modelo matemático do sistema de potência, conceitos de estabilidade, métodos existentes para a análise de estabilidade e domínios de estabilidade utilizando-se o segundo método de Liapunov. Será discutido um procedimento para determinação do ponto de equilíbrio pós-defeito, no caso da não obtenção da convergência no fluxo de potência, e apresentado um índice de segurança para o sistema considerando-se várias contingências.

Este capítulo constitui-se essencialmente de uma revisão do que já se encontra extensivamente descrito na literatura [1,2,4,10,12] , com o propósito de tornar este trabalho auto-contido.

2.2 - Modelo Matemático do Sistema de Potência

O modelo matemático do sistema considerado é representado pelo conjunto de equações diferenciais ordinárias

não lineares [9,13,14]

$$M_i \ddot{\delta}_i + d_i \dot{\delta}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} (\dot{\delta}_i - \dot{\delta}_j) + P e_i = P m_i \quad (2.2.1)$$

$i = 1, 2, \dots, n.$

que descrevem um sistema de potência com n-máquinas representadas por uma fonte de tensão atrás de sua reatância transitória, com as hipóteses normalmente usadas para modelo clássico de máquina, mostrados no Apêndice A.

Os pontos de equilíbrio de (A.7) são da forma $[\alpha^e \ 0^T]^T$, $\alpha^e \in \mathbb{R}^{n-1}$, $0 \in \mathbb{R}^n$, α^e é o ângulo de equilíbrio.

A estabilidade do equilíbrio é observada a partir da definição do politopo [2,4,6,7].

$$L = \{ \alpha / |\alpha_i| \leq \frac{\pi}{2}, |\alpha_i - \alpha_j| \leq \frac{\pi}{2}, i, j = 1, 2, \dots, n-1 \} \quad (2.2.2)$$

Se $\alpha^e \in L$, então $[\alpha^e \ 0^T]^T$ é um ponto de equilíbrio assintoticamente estável e tem-se, portanto, uma condição suficiente para a estabilidade do equilíbrio em L.

2.3 - Análise da Estabilidade

Para a análise da estabilidade em sistemas de potência, a solução analítica é inviável. Pode-se então fazer uso

de dois procedimentos. O primeiro usa métodos numéricos para a solução das equações diferenciais representativas do sistema de potência, durante o período transitório, onde as condições sobre a estabilidade são obtidas pela análise das curvas que mostram o comportamento dos ângulos internos das máquinas no tempo, tendo a vantagem de não depender do modelo do sistema, e como desvantagens a necessidade da intervenção externa para a definição dos parâmetros da análise, o tempo de processamento relativamente alto e a necessidade de análise de curvas solução.

O segundo procedimento baseia-se em métodos que não usam o conhecimento explícito das soluções das equações diferenciais. Entre estes está o método usado neste trabalho para a análise da estabilidade transitória baseado no segundo método de Liapunov que permite determinação de domínios de estabilidade através da energia do sistema tomada como função de Liapunov [1,2,4] .

O segundo método de Liapunov permite a afirmação da estabilidade quando o ponto de equilíbrio pré-falta estiver contido no domínio de estabilidade do ponto de equilíbrio do sistema sob contingência. Se isto não ocorrer, assume-se instabilidade, embora possa não ser necessariamente.

Embora o segundo método de Liapunov não oriente a procura de funções de Liapunov, encontrada uma função que satisfaça as condições necessárias, pode-se tirar conclusões sobre a estabilidade e também encontrar meios para a determinação de domínios de estabilidade.

Para aplicação do segundo método de Liapunov pode-se seguir os seguintes passos [1,2] :

- 1 - Construir uma função de Liapunov;

2 - Determinar uma região ou domínio de estabilidade;

3 - Verificar se os estados do sistema imediatamente após a retirada do defeito se encontram no interior da região determinada.

Considerando uma função escalar de variáveis de estado, $V(x)$, ($X \in R^m$), e uma região conexa ψ que contém a origem, para que esta função seja considerada de Liapunov, ela deve satisfazer as seguintes condições [1,2,3,4,9]:

$$V(X) > 0 ; X \neq 0 \quad (2.3.1)$$

$$V(X) = 0 ; X = 0 \quad (2.3.2)$$

$$\dot{V}(X) \leq 0 ; X \neq 0 \quad (2.3.3)$$

$$\dot{V}(X) = 0 ; X = 0 , X \in \psi \quad (2.3.4)$$

onde:

V - Função de Liapunov

X - Vetor dos estados do sistema e

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} \quad (2.3.5)$$

é chamada derivada de V ao longo das trajetórias do sistema.

Em [1,3] mostra-se que a função energia total do sistema (2.2.1) é uma função de Liapunov para a estabilidade assintótica do ponto de equilíbrio. A função energia total do sistema é dada por:

$$V = E_p + E_c \quad (2.3.6)$$

onde: E_p - Energia potencial do sistema
 E_c - Energia cinética do sistema

e V é dada por:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} [-\cos (z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e - z_{ij} \sin \alpha_{ij}^e] + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} [-\cos (z_i + \alpha_i^e) + \cos \alpha_i^e - z_i \sin \alpha_i^e] \quad (2.3.7)$$

onde: $z_{ij} = z_i - z_j$ e $\alpha_{ij}^e = \alpha_i^e - \alpha_j^e$

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2$$

$$E_p = V - E_c \quad (2.3.8)$$

Observa-se que o gradiente da energia potencial, ∇E_p , é tal que $\nabla E_p = P_{e_i} - P_{m_i}$.

Os pontos extremos da energia potencial são dados por $\nabla E_p = P_{e_i} - P_{m_i} = 0$. Assim os pontos de equilíbrio do sistema (2.2.1) coincidem com os pontos extremos da função energia potencial E_p dada em (2.3.8). Em [1] mostra-se que a função V é válida como função de Liapunov na região:

$$G = \{|\omega^T, Z^T|^T / \bar{Z}^3 \in L_2\} \quad (2.3.9)$$

onde:

$$L_2 = \{Z \mid (-\pi-2 \alpha_k^e) \leq z_k \leq (\pi-2 \alpha_k^e) \text{ e } (-\pi-2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e)) \leq z_{kp} \leq (\pi-2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e))\} \quad k, p = 1, \dots, n-1, k \neq p \quad (2.3.10)$$

De (2.2.2) e (2.3.10) conclui-se que:

$$\text{Se } \alpha^e \in L \implies L \subset L_2$$

Obtida uma função de Liapunov V , e determinada a região G , onde ela é válida como função de Liapunov, o passo seguinte é encontrar um domínio de estabilidade assintótica para a origem de (2.2.1) colocado na forma abaixo, conforme apêndice A:

$$\dot{z}_i = \omega_i - \omega_n \quad i = 1, \dots, n-1.$$

$$\dot{\omega}_i = M_i^{-1} \left[a_i \omega_i - \sum_{\substack{j=i \\ j \neq i}}^n b_{ij} (\omega_i - \omega_j) + f_i(P, F, Z + \alpha^e) \right] \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.3.11)$$

2.4 - Domínio de Estabilidade

Domínio de estabilidade é um conjunto de condições iniciais que especificam trajetórias do sistema que alcançam o equilíbrio estável pós-defeito [2]. Dentre os métodos de cálculo de domínio de estabilidade [10], têm-se, entre outros, o método do ponto de sela, método aproximado de Prabhakara e método do politopo.

O método do ponto de sela [9,15,16] consiste em encontrar, entre todos os pontos de equilíbrio instáveis, o que especifica menor energia potencial. Isto significa encontrar a maior superfície de nível fechada da energia potencial, que contenha só um ponto de equilíbrio em seu interior. Obtêm-se em geral com este método resultados conservativos, podendo-se incorrer em um valor para o domínio de estabilidade maior que o real, dado à não existência de garantias de que o ponto de equilíbrio instável encontrado por métodos numéricos seja o de menor valor de energia potencial.

No método aproximado de Prabhakara [16], o domínio de estabilidade fica definido pelo menor valor de energia potencial encontrada em condições iniciais especificadas a partir de uma analogia com o caso de estabilidade de uma máquina contra barra infinita. O resultado obtido, seria de confiança, se houvesse a certeza de que as condições iniciais usadas estivessem sempre suficientemente próximas dos pontos de equilíbrio instáveis, fato este que não é comprovado matematicamente e que, por isso, introduz uma margem de incerteza no resultado.

O método citado acima, depende da localização da máquina de referência. Para contornar este e outros problemas,

usa-se o método do politopo, que resume-se em encontrar a maior superfície de nível da energia potencial tangente e inteiramente contida na sua região de validade L_2 , de forma a se obter um resultado confiável. A região de validade, por construção, possui apenas o ponto de equilíbrio estável em análise e, devido a isto, a superfície de nível que definirá o domínio de estabilidade, será sempre interior à uma superfície que não contém nenhum ponto de sela do sistema. Este fato faz com que o resultado dado pelo método do politopo possa ser conservativo em relação ao dado pelo método do ponto de sela, portanto a favor da segurança, mas sem o perigo de apresentar um valor maior que o domínio de estabilidade relativo ao ponto de sela com menor energia potencial [1,10,17], isto é sem riscos de resultados otimistas.

Usa-se neste trabalho, o método do politopo, devido às razões mencionadas acima.

No método do politopo, o problema de encontrar um domínio de estabilidade assintótica para a origem pode ser resolvido através de um programa de otimização, apresentado no Apêndice B.

2.5 - Pontos de Equilíbrio Pré e Pós-Falta

Para análise da estabilidade transitória de um sistema, as informações importantes são as que indicam o comportamento dos ângulos de suas máquinas geradoras. Para a obtenção destes valores, deve ser resolvido inicialmente um problema de fluxo de carga, obtendo-se assim os ângulos internos das

máquinas [10], calculados através de um fluxo de potência usando-se o método Newton Raphson Desacoplado Rápido. Supondo-se que o sistema em questão seja um sistema bem planejado, em geral, não deverão existir problemas de convergência pré-defeito.

A determinação do equilíbrio pós-defeito é feita utilizando-se o mesmo método AC usado no cálculo do equilíbrio pré-defeito e fixando-se os módulos de tensão obtidos a partir do fluxo de potência relativo ao pré-defeito. Supõe-se que a potência mecânica é constante durante o transitório.

Quanto ao problema da convergência, nem sempre ela é obtida no fluxo pós-defeito, então, propõe-se neste caso, o cálculo do ângulo de equilíbrio pós-defeito através da análise de sensibilidade do sistema [11,12] .

Neste caso, seja um sistema descrito no caso básico por:

$$\underline{B}^0 \underline{\theta}^0 = \underline{P} \quad (2.5.1)$$

onde:

- \underline{B}^0 - Matriz admitância
- $\underline{\theta}^0$ - Vetor cujas componentes são os ângulos nodais θ_k
- \underline{P} - Vetor das injeções de potência ativa P_k

Quando ocorrem variações nas capacidades de transmissão das ligações devidas a acréscimos ou retiradas de linhas e/ou transformadores, há uma variação correspondente nos ângulos nodais, uma vez que as injeções de potência são supostas constantes [12] . A nova situação pode ser representada pela equação:

$$\underline{B} \underline{\theta} = \underline{P} \quad (2.5.2)$$

sendo:

$$\underline{B} = \underline{B}^0 + \underline{\Delta B} \quad (2.5.3)$$

$$\underline{\theta} = \underline{\theta}^0 + \underline{\Delta \theta} \quad (2.5.4)$$

Substituindo-se (2.5.3) e (2.5.4) em (2.5.2), e considerando-se (2.5.1), obtém-se:

$$\underline{B}^0 \underline{\Delta \theta} + \underline{\Delta B} \underline{\theta}^0 + \underline{\Delta B} \underline{\Delta \theta} = 0 \quad (2.5.5)$$

Fazendo-se uso da análise de sensibilidade melhorada, o termo de segunda ordem não é desprezado, obtendo-se assim resultados exatos (em relação ao modelo DC). Como mostra-se a seguir, isto pode ser conseguido usando-se os resultados de [12].

Da equação (2.5.5) tem-se:

$$\underline{B}^0 \underline{\Delta \theta} + \underline{\Delta B} (\underline{\theta}^0 + \underline{\Delta \theta}) = 0 \quad (2.5.6)$$

O problema da análise de sensibilidade melhorada, consiste em se determinar $\underline{\Delta \theta}$ a partir de (2.5.6), sem se desprezar o termo de segunda ordem. Conhecido $\underline{\Delta \theta}$, as demais grandezas de interesse podem ser calculadas.

De [12] define-se:

$$\underline{\Delta B} = \underline{M} \underline{\Delta \gamma} \underline{M}^t \quad (2.5.7)$$

onde:

$$M = \underline{e}_{k\ell} \quad (2.5.8)$$

$$\Delta\gamma = \Delta\gamma_{k\ell} \quad (2.5.9)$$

sendo: $\underline{e}_{k\ell}$ - vetor de dimensão $nb - 1$, formado por zeros, com exceção dos elementos k e ℓ que valem respectivamente, $+1$ e -1 (se um dos terminais for a barra de referência, o elemento correspondente não aparece no vetor) tem-se:

$$\underline{e}_{k\ell} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ \\ \ell \end{matrix} \quad (2.5.10)$$

e: $\Delta\gamma_{k\ell}$ - variação introduzida na capacidade de transmissão da ligação $k - \ell$.

A capacidade de transmissão de uma ligação $k - \ell$ é $\gamma_{k\ell} = \frac{1}{x_{k\ell}}$, onde $x_{k\ell}$ é a reatância de ligação $k - \ell$.

Introduzindo-se a expressão (2.5.7) em (2.5.6), obtém-se:

$$\Delta\theta = -Z^0 M \Delta\gamma M^t (\underline{\theta}^0 + \Delta\underline{\theta}) \quad (2.5.11)$$

onde: $Z^0 = B^0{}^{-1}$

sendo:

$$\underline{e}_{k\ell}^t \Delta\underline{\theta} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_\ell = \Delta\theta_{k\ell}$$

$$M^t \underline{\theta}^0 = \underline{e}_{k\ell}^t \underline{\theta}^0 = \theta_k^0 - \theta_\ell^0 = \theta_{k\ell}^0 \quad (2.5.12)$$

Substituindo-se (2.5.8), (2.5.9) e (2.5.12) em (2.5.11), tem-se:

$$\Delta \theta = -\Delta \gamma_{kl} (\theta_{kl}^0 + \Delta \theta_{kl}) Z^0 \underline{e}_{kl} \quad (2.5.13)$$

Multiplicando-se (2.5.13) por \underline{e}_{kl}^t e explicitando-se $\Delta \theta_{kl}$ tem-se:

$$\Delta \theta_{kl} = - \frac{\underline{e}_{kl}^t Z^0 \underline{e}_{kl}}{\Delta \gamma_{kl}^{-1} + \underline{e}_{kl}^t Z^0 \underline{e}_{kl}} \theta_{kl}^0 \quad (2.5.14)$$

Introduzindo-se finalmente (2.5.14) em (2.5.13) obtém-se:

$$\Delta \theta = - \frac{\Delta \gamma_{kl} \theta_{kl}^0}{1 + \underline{e}_{kl}^t Z^0 \underline{e}_{kl} \Delta \gamma_{kl}} Z^0 \underline{e}_{kl} \quad (2.5.15)$$

Considerando-se:

$$\underline{W}_{kl} = Z^0 \underline{e}_{kl} \quad (2.5.16)$$

tem-se:

$$\Delta \theta = - \frac{\Delta \gamma_{kl} \theta_{kl}^0}{1 + \underline{e}_{kl}^t Z^0 \underline{e}_{kl} \Delta \gamma_{kl}} \underline{W}_{kl} \quad (2.5.17)$$

$\Delta \theta$ é o acréscimo de ângulo correspondente à alteração no sistema dada por $\Delta \gamma_{kl}$ [11,12]. A utilização da

expressão (2.5.17) no estudo do efeito da remoção de elementos da rede de transmissão é mostrada no Apêndice C.

2.6 - Índice de Segurança

A segurança transitória de um sistema é avaliada através da alcançabilidade de um novo ponto de operação do sistema, após a ocorrência de uma determinada contingência (constituída pela perda de linhas do sistema neste trabalho). Avalia-se a segurança transitória do sistema, calculando-se o domínio de estabilidade do novo ponto de operação do sistema e comparando-se o valor de energia correspondente ao domínio de estabilidade com o valor da energia calculada no estado do sistema no instante em que o defeito é eliminado [2,3,5,6] .

Em [2,6] define-se índice de segurança, como uma medida da margem de segurança do sistema sob contingência.

$$I_s^i = \frac{E_P^i(Z^*) - E_P^i(\alpha^0)}{E_P^i(Z^*)} \quad (2.6.1)$$

onde: "i" refere-se à contingência considerada na i-ésima linha de transmissão do sistema, $E_P(Z^*)$ é a energia potencial do domínio de estabilidade e $E_P(\alpha^0)$ é a energia potencial calculada no ponto de operação calculado no momento da retirada da linha, E_P avaliada em relação ao equilíbrio pós-defeito.

Considera-se a análise de contingência como sendo

a análise do impacto da perda de cada linha de transmissão, uma por vez, ou de cada linha de um conjunto especificado. Considerando-se várias contingências, o índice de segurança do sistema é definido como sendo $|3|$.

$$I_s = \min_{i \in Q} (I_s^i) \quad (2.6.2)$$

onde: Q - conjunto dos índices das linhas que constituem o conjunto de contingências.

Se o sistema é seguro $I_s > 0$, isto significa que $\forall i \in Q, I_s^i > 0$ e, portanto, o ponto de operação normal de operação pertence à interseção de todos os domínios de estabilidade dos pontos de equilíbrio em contingência.

Neste trabalho usou-se a denominação "Índice de Estabilidade" (XDES ou ξ) definido como:

$$XDES^i = 1 - I_s^i = \xi^i \quad (2.6.3)$$

O cálculo do índice é importante para a utilização do algoritmo proposto, pois para uma dada configuração, ele dá idéia do afastamento da energia potencial do ponto de operação no momento da retirada da falta, em relação à energia potencial do domínio de estabilidade.

Considerando várias contingências, o índice de estabilidade do sistema é dado por:

$$XDES = \max_{i \in Q} (XDES^i) \quad (2.6.4)$$

onde: Q foi definido na equação (2.6.2)

Empiricamente, ou melhor, através da experiência, pode-se estabelecer um índice de estabilidade que forneça uma margem adequada de segurança, tal que o ponto de operação possa sofrer pequenas variações, sem se tornar inseguro.

Portanto, o problema neste caso consiste em melhorar a segurança em relação às contingências que causam sobrecarga, mantendo-se um nível de segurança especificado para o sistema, através de redespacho de geração ou, em extremo, à custa de alívio de carga.

2.7 - Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o modelo matemático do sistema de potência, na forma de equações diferenciais representativas do comportamento das máquinas do sistema. Para o uso deste modelo, reduziu-se o sistema às barras internas de máquinas.

Comentaram-se os métodos existentes para a análise da estabilidade em sistemas de potência. Foi apresentado o segundo método de Liapunov e sua aplicação em sistemas de potência, tomando-se a função energia como função de Liapunov, como mostram as referências [1,2,3,4,9].

Foram comentados três métodos para o cálculo de domínios de estabilidade, citando-se as vantagens do método do polítopo em relação aos outros métodos.

É importante observar, que a análise da segurança depende do cálculo do domínio de estabilidade, não dependendo, no

entanto, do procedimento utilizado para a obtenção do domínio. Domínios com menor grau de conservatividade são desejáveis e poderão ser usados no algoritmo proposto neste trabalho, para a melhoria da segurança.

Adotou-se para a obtenção dos pontos de equilíbrio pré e pós-defeito, o uso do fluxo de potência Newton Raphson Desacoplado Rápido, a menos de casos em que não há convergência, onde os pontos de equilíbrio pós-falta são calculados através da análise de sensibilidade [11,12] .

Apresentou-se um índice de segurança, de acordo com [2,6] como medida da margem de segurança do sistema e estabeleceu-se que as contingências são constituídas pela perda de linhas do sistema.

No capítulo seguinte mostra-se um procedimento para a melhoria da segurança do sistema.

C A P Í T U L O I I I

MELHORIA DA SEGURANÇA

3.1 - Introdução

Neste capítulo, faz-se primeiramente uma interpretação do problema da eliminação de sobrecargas, considerando a estabilidade transitória. A eliminação de sobrecargas é feita através de uma mudança do ponto de equilíbrio do sistema, por meio da realocação de geração e, como último recurso, do alívio de carga [2]. Isto é feito com o desenvolvimento de uma restrição, que define um conjunto de estados desejado de segurança para o sistema, utilizando-se um modelo linearizado da expressão da energia potencial calculada no instante da retirada do defeito e da expressão da energia potencial calculada no ponto de tangência referente ao domínio de estabilidade. Uma vez satisfeita esta restrição, formulada para cada contingência, garante-se segurança quanto à estabilidade transitória, em relação a todas as contingências pré-escolhidas e em relação ao modelo linearizado.

As restrições de estabilidade transitória são usadas juntamente com uma restrição de balanço de potência, com restrições de limites de geração e com restrições de limites de carga, na solução de um problema de otimização, em que são usados os métodos de programação linear simplex primal e neste trabalho,

o método dual, minimizando o desvio do estado nominal de geração e minimizando o corte de carga, de acordo com penalidades impostas na função objetivo.

De forma a tornar auto contido este trabalho seguem-se, até o item 2.5.4 as referências [2 e 5], tentando-se reapresentar o problema de forma mais didática.

Em seguida propõe-se um algoritmo para a análise da estabilidade transitória e melhoria da segurança de um sistema de potência, que usa uma sequência de solução do problema acima, e utiliza a formulação dual para os problemas de programação linear.

Propõe-se também um fator de aceleração para aumentar a convergência do algoritmo proposto.

3.2 - Interpretação do Problema da Melhoria da Segurança

Um sistema elétrico de potência pode sofrer violações na sua segurança, devido à retirada de alguma linha ou várias linhas de operação, causando problemas de estabilidade transitória e sobrecargas na transmissão.

Seja A_1 o espaço das potências de geração, A_2 o espaço dos ângulos e F uma função dependente da configuração do sistema [3] .

Considere-se um despacho de geração inicial P^0 , correspondente ao ponto de operação inicial α_e^0 e uma dada configuração F_0 do sistema de transmissão.

Para cada contingência simulada é encontrado:

- o ponto de operação α_e^i
- o domínio de estabilidade D_i para α_e^i

Supõe-se que para o ponto α_e^o , três contingências são simuladas, como mostra a figura 3.1.

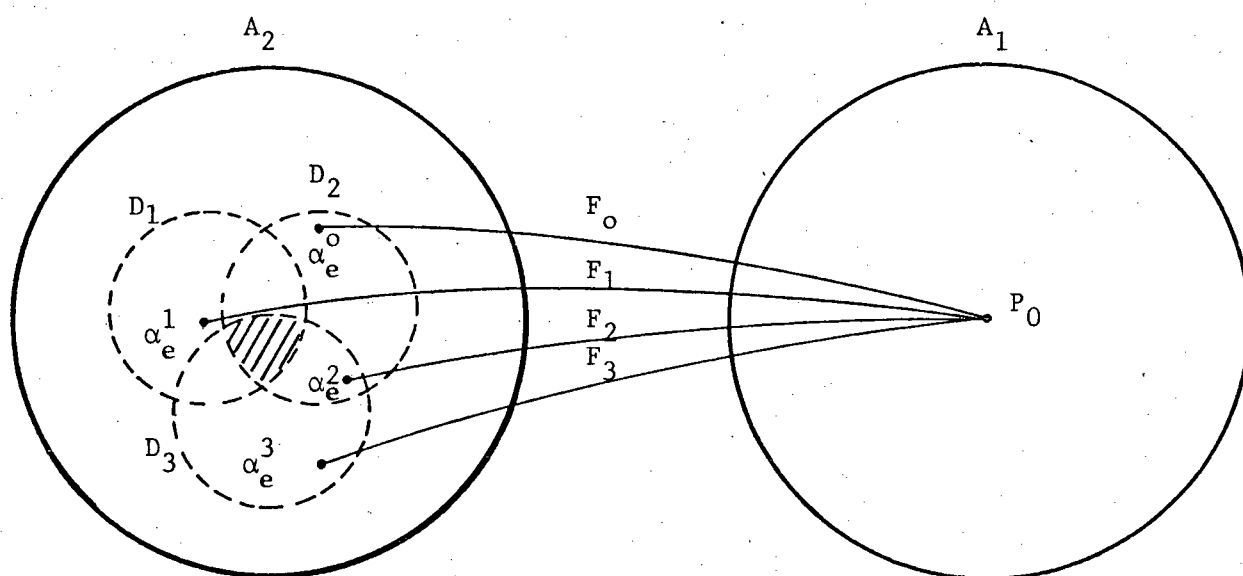


Figura 3.1

Neste caso o sistema não satisfaz à uma análise de contingências, isto é: $\alpha_e^o \notin \bigcap_{i \in I} D_i$

$$i \in I$$

onde:

I - conjunto dos índices das contingências simuladas

Em situações como a apresentada acima, é desejável

encontrar um novo despacho P^* e o correspondente ponto de operação α_e^* , de forma que a análise de contingências seja satisfeita. Para isto, a partir de P_0 e do ponto de operação α_e^0 , deve ser feito um remanejamento de geração, e em último caso, um alívio de carga de modo a encontrar um novo ponto de operação α_e^* pertencente à interseção dos domínios associados a cada contingência.

A figura 3.2 ilustra este problema.

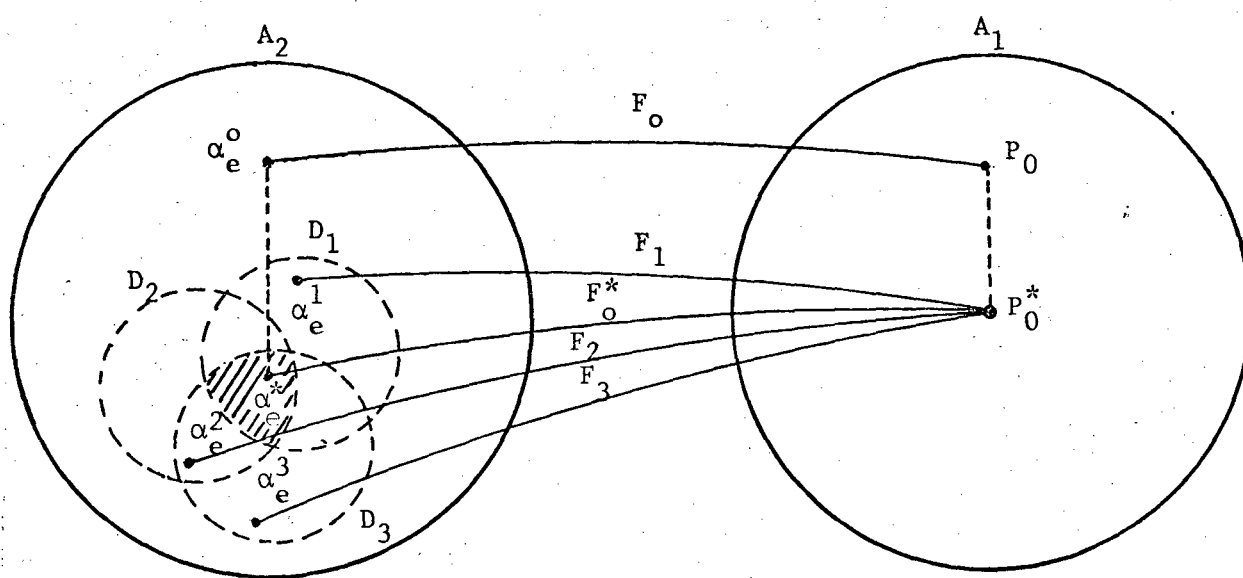


Figura 3.2

Neste caso $\alpha_e^* \in \bigcap_{i \in I} D_i$ e a operação é segura para as contingências consideradas.

A obtenção do novo despacho pode ser formulada através de um problema de otimização onde se minimiza o desvio do estado nominal de geração e, se necessário, minimiza o corte de carga, sujeito às restrições impostas. A função objetivo é

proposta de forma a prevalecer a realocação de geração na solução, e o corte de carga deverá ser utilizado como último recurso. Esta imposição é feita apropriadamente na formulação da função objetivo do problema de programação linear, conforme será visto mais adiante.

3.3 - Obtenção da Restrição de Estabilidade Transitória

Considerando-se o sistema em sobrecarga (um sistema tem sobrecarga, quando para alguma contingência é violada a sua segurança), isto pode ser eliminado, conseguindo-se que o ponto de operação seja modificado através de mudanças nas injeções de potência, e/ou alterações na carga do sistema, de modo que se tenha | 2,5 | :

$$E_p(\alpha_e^*) \leq E_p(Z^{*'}) \quad (3.3.1)$$

onde α_e^* - novo ponto de equilíbrio pré-defeito após a mudança nas injeções.

$Z^{*'}$ - novo ponto de tangência | Apêndice B | , correspondente ao domínio de estabilidade pós defeito para uma certa contingência.

Este objetivo pode ser alcançado da forma abaixo.

A partir de (3.3.1) escreve-se:

$$E_p(\alpha_e^*) = \xi E_p(Z^{*'}) \quad (3.3.2)$$

onde: ξ - é tal que $0 \leq \xi \leq 1$ é chamado índice de estabilidade [2,5].

Desta forma, o problema de melhoria da segurança pode ser visto da seguinte maneira:

dado um índice de estabilidade desejado (ξ), encontrar um vetor:

$$P' = \begin{bmatrix} P_G'^T & | & -P_L'^T \end{bmatrix}^T \quad (3.3.3)$$

de modo que a relação (3.3.2) seja verificada. P_G' e P_L' são os vetores de potência ativa de geração e de carga, respectivamente.

Para a obtenção do vetor (3.3.3), sabe-se que o controle sobre o ponto de operação é feito por P (potência ativa), portanto é preciso determinar um acréscimo ΔP tal que (3.3.2) seja satisfeito.

Por conveniência, representa-se a rede através de barras essencialmente de geração ou de carga e fazendo-se uso de fluxo de potência(DC) tem-se [2,5] :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ -\Delta P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \theta} \end{bmatrix} \Delta \theta \quad (3.3.4)$$

onde:

onde:

ΔP_G - mudança na potência ativa dos geradores.

ΔP_L - mudança na carga.

$\Delta \theta$ - variações nos ângulos de tensão de barras.

f - função de transporte de potência em cada barra.

$$\left[\frac{\partial f}{\partial \theta} \right] = H - \text{matriz Jacobiana}$$

Assim a equação (3.3.4) pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ -\Delta P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{GG} & H_{GL} \\ H_{LG} & H_{LL} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \theta_L \end{bmatrix} \quad (3.3.5)$$

onde:

$\Delta \alpha$ - variações de ângulos nas barras de geração.

$\Delta \theta_L$ - variações de ângulos nas barras de carga.

Na equação (3.3.5) está excluída a n -ésima máquina que foi tomada como referência. Portanto, H é de dimensão $(m-1) \times (m-1)$, onde m é o número de barras da rede.

De acordo com [2], pode-se determinar uma relação entre ΔP_G , ΔP_L e $\Delta \alpha$ da forma:

$$f(\Delta P_G, \Delta P_L, \Delta \alpha) = 0 \quad (3.3.6)$$

Isto pode ser feito decompondo-se (3.3.5) em dois subsistemas:

$$\Delta P_G = H_{GG} \cdot \Delta \alpha_G + H_{GL} \cdot \Delta \theta_L \quad (3.3.7)$$

$$-\Delta P_L = H_{LG} \cdot \Delta \alpha_G + H_{LL} \cdot \Delta \theta_L \quad (3.3.8)$$

Da equação (3.3.8) obtem-se $\Delta\theta_L$ e substituindo-o em (3.3.7), pode-se expressar ΔP_G por:

$$\Delta P_G + H_{GL} \cdot H_{LL}^{-1} \cdot \Delta P_L = (H_{GG} - H_{GL} - H_{LL}^{-1} \cdot H_{LG}) \Delta\alpha_G \quad (3.3.9)$$

Fazendo-se:

$$H_G = [H_{GL} \cdot H_{LL}^{-1}] \quad (3.3.10)$$

e

$$H_{red} = [H_{GG} - H_{GL} - H_{LL}^{-1} \cdot H_{LG}] \quad (3.3.11)$$

Substituindo-se (3.3.10) e (3.3.11) em (3.3.9) obtém-se | 2 | :

$$\Delta\alpha_G = H_{red}^{-1} [\Delta P_G + H_G \cdot \Delta P_L] \quad (3.3.12)$$

A equação (3.3.12) mostra a variação do ângulo de máquina em função da mudança do nível de geração ou do nível de carga, no caso de corte de carga.

Fazendo-se uso das equações do algoritmo Newton-Raphson | 2 | , para a obtenção do ponto de tangência do domínio de estabilidade e considerando-se a primeira aproximação | 5 | , tem-se:

$$Z^{*'} = -J(0)^{-1} VE(0) \quad (3.3.13)$$

onde:

$Z^{*'}$ é da forma:

$$Z^{*'} = [(z^{*'})^T \lambda^T]^T \quad (3.3.14)$$

- E - função Lagrangeana (Apêndice B, B.8 ou B.10)
- z^* - ponto de tangência do domínio de estabilidade do ponto de equilíbrio pós-defeito
- $J(0)$ - Jacobiano da função Lagrangeana (Apêndice B, B.7, B.10) calculado na origem $z = 0$
- $\nabla E(0)$ - gradiente do Lagrangeano calculado em $z = 0$ e como a origem é ponto de equilíbrio, $\nabla E(0)$ é da forma :
- $$\begin{bmatrix} 0^T \\ \pm \pi - 2 \alpha_k^e \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad \begin{bmatrix} 0^T \\ \pm \pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e) \end{bmatrix},$$
- $0 \in \mathbb{R}^{n-1}$
- λ - multiplicador de Lagrange (Apêndice B, B.8 ou B.10)

Da equação (3.3.13) pode-se expressar z^* em função do equilíbrio pós-falta, α_d^e como segue [2,5] :

$$z^* = g(\alpha_d^e) \quad (3.3.15)$$

Representando-se a equação (3.3.15) em termos das variáveis envolvidas, de acordo com [2], tem-se:

$$\Delta Z_i = -2 \cdot v_i \cdot \Delta \alpha_k, \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (3.3.16-a)$$

para as faces do tipo $Z_k = z - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e)$

$$e \quad \Delta Z_i = -2 \cdot v_i \cdot \Delta \alpha_k + 2 \cdot v_i \cdot \Delta \alpha_p$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (3.3.16-b)$$

para as faces do tipo $z_{kP} = z_{kP} - (\pm \pi-2 \alpha_k^e)$

onde: $\Delta\alpha_k$ e $\Delta\alpha_p$ - acréscimos nas componentes k e p do ponto de equilíbrio pré-falta
 v_i - i -ésima componente da n -ésima coluna da inversa do Jacobiano $|2|$.

$$v_i = \frac{z_i^k}{Q_k}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.3.17)$$

sendo: Q_k - n -ésima componente de $-\nabla E(0)$

De (3.3.17) observa-se que v_i é dependente do equilíbrio do sistema (origem das coordenadas Z). Desta forma, quando processada uma mudança no equilíbrio, haverá alteração nos elementos do Jacobiano. Por outro lado, esta variação pode ser desprezada pelas mesmas razões atribuídas pela aceitação de um fluxo de potência linear $|2|$. Pode-se admitir então que v_i permanece constante, quando ocorrem pequenas mudanças no ponto de equilíbrio. Observa-se que os coeficientes v_i representam a última coluna da inversa do Jacobiano de (3.3.13) $|2|$. Uma vez determinada a tangência através do algoritmo proposto em $|2,5|$, os v_i são determinados utilizando a relação (3.3.16).

Pode-se expressar de forma apropriada a variação da tangência em função da mudança do ponto de equilíbrio, por um modelo linear da seguinte forma $|2|$:

$$\Delta Z = A \cdot \Delta\alpha_d \quad (3.3.18)$$

sendo que A $(n-1) \times (n-1)$ é a matriz sensibilidade entre a variação do ponto de tangência e a variação do ponto de equilíbrio pós-defeito, cuja estrutura é formada a partir das equações (3.3.16), conforme a face. Quando a face for do tipo z_k , a matriz A é formada por zeros, exceto a k -ésima coluna que é dada por $(-2v_i)$, $i = 1, 2, \dots, n-1$. No caso da face ser do tipo z_{kp} , da mesma forma é composta de zeros, exceto a k -ésima e a p -ésima colunas que são dadas por $(-2v_i)$ e $(2v_i)$, para $i = 1, 2, \dots, n-1$.

Fazendo-se agora uma linearização de (3.3.2) tem-se [2] :

$$C^T \Delta \alpha_a + D^T \Delta \alpha_d = b \quad (3.3.19)$$

onde:

$$C \Delta = \left[\frac{\partial E_p(\alpha_a^e, \alpha_d^e)}{\partial \alpha_a^e} \right] \quad (3.3.20)$$

$$D \Delta = \left[\frac{\partial E_p(\alpha_a^e, \alpha_d^e)}{\partial \alpha_d^e} - \xi \frac{\partial E_p(Z^*, \alpha_d^e)}{\partial Z^*} A - \xi \frac{\partial E_p(Z^*, \alpha_d^e)}{\partial \alpha_d^e} \right] \quad (3.3.21)$$

e

$$b \Delta = \xi E_p(Z^*, \alpha_a^e) - E_p(\alpha_a^e, \alpha_d^e), \quad \xi \text{-índice de estabilidade.} \quad (3.3.22)$$

As variáveis de (3.3.19) são dependentes do sistema, por este motivo é necessário expressar (3.3.19) em função das variáveis de controle, isto é, as injeções de potência.

Considerou-se no Apêndice A, que a potência mecânica das máquinas é suposta constante durante o período

transitório, então ΔP_G será o mesmo tanto na situação pré-defeito, como na pós-defeito. ΔP_L também será igual em ambas as situações. Desta forma, a partir de (3.3.12) pode-se representar as variações dos ângulos da seguinte forma:

Pré-defeito:

$$H_{red_a}^{-1} \cdot [\Delta P_G + H_{Ga} \Delta P_L] = \Delta \alpha_a \quad (3.3.23)$$

Pós-defeito:

$$H_{red_d}^{-1} [\Delta P_G + H_{Gd} \Delta P_L] = \Delta \alpha_d \quad (3.3.24)$$

Substituindo-se (3.3.23) e (3.3.24) em (3.3.19), obtém-se:

$$C^t [H_{red_a}^{-1} \Delta P_G + H_{red_a}^{-1} H_{Ga} \Delta P_L] + D^t [H_{red_d}^{-1} \Delta P_G - H_{red_d}^{-1} H_{Gd} \Delta P_L] = b \quad (3.3.25)$$

Reagrupando-se ΔP_G e ΔP_L , tem-se

$$[C^t H_{red_a}^{-1} + D^t H_{red_d}^{-1}] \Delta P_G + [C^t H_{red_a}^{-1} H_{Ga} + D^t H_{red_d}^{-1} H_{Gd}] \Delta P_L = b \quad (3.3.26)$$

Obtendo-se assim:

$$R^t \cdot \Delta P_G + S^t \cdot \Delta P_L = b \quad (3.3.27)$$

que relaciona a variação do ponto de equilíbrio pós-defeito, função de um certo nível de operação especificado ξ , com variações da geração e da carga do sistema, onde:

$$R^t = [C^t H_{red_a}^{-1} + D^t H_{red_a}^{-1}] \quad (3.3.28)$$

e

$$S^t = [C^t H_{red_a}^{-1} H_{Ga} + D^t H_{red_d}^{-1} H_{Gd}] \quad (3.3.29)$$

Portanto, é formulada em (3.3.27), a restrição de estabilidade transitória [2,5], para o problema de otimização a ser definido adiante.

Para o caso da análise de várias contingências, a equação (3.3.27) fica:

$$R_i^t \cdot \Delta P_G + S_i^t \cdot \Delta P_L = b$$

onde: $i=1,2,\dots,m$, m número de contingências simuladas.

O número de restrições de estabilidade será igual ao número de contingências simuladas. Do ponto de vista do problema linearizado mesmo que para uma determinada contingência o sistema não fique sobrecarregado, ela será levada em conta para que o novo ponto de operação pertença também ao domínio de estabilidade correspondente. Com isso a idéia que se coloca inicialmente é que as contingências menos críticas terão suas seguranças diminuídas em favor das contingências mais críticas, sem que no entanto, tornem-se inseguras, continuando assim a ser observada a margem de segurança especificada. Para se conseguir isto no problema linearizado, realoca-se a geração e/ou corta-se carga.

Define-se em seguida um problema de programação linear de modo a tornar seguro o sistema minimizando-se o desvio do ponto de operação inicial e com mínimo corte de carga.

3.4 - Formulação da Função Objetivo

O problema geral consiste em encontrar um ponto de operação seguro de forma a:

- Minimizar o desvio em relação ao estado nominal de geração
- Minimizar o corte de carga

Estes critérios serão usados e colocados como uma função escalar de penalidades [2,18] da forma:

$$FO = \sum_{i=1}^{n-1} g_i (\Delta P_{Gi}) + \sum_{i=1}^{n_l} h_i (\Delta P_{Li}) \quad (3.4.1)$$

onde: n - número de barras de geração

n_l - número de barras de carga

h e g - funções não lineares que representam os custos de geração e custos de carga, respectivamente.

O uso da programação linear requer que estes custos sejam funções lineares, portanto, deve-se construir esta função por aproximações, através de vários segmentos lineares. A

função adotada neste trabalho, em relação à geração, é representada por dois segmentos lineares [2,5,18], conforme a figura 3.3.

$$FO = \sum_{i=1}^{n-1} (\rho_i \Delta P_{Gi}^+ + \mu_i \Delta P_{Gi}^-) + \sum_{i=1}^{n_l} -\gamma_i (\Delta P_{Li}') \quad (3.4.2)$$

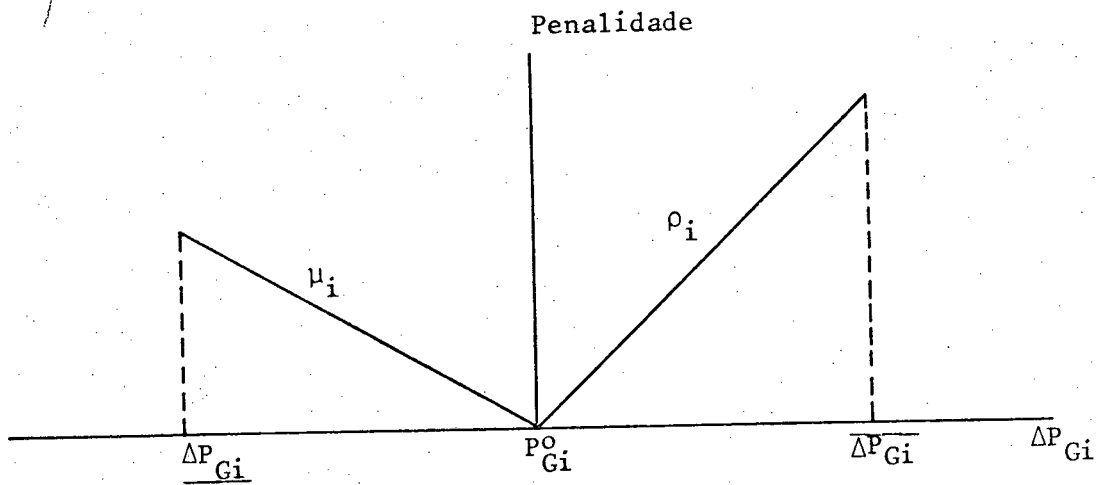


Figura 3.3 : Parcela da função objetivo linearizada por partes referentes à i -ésima máquina.

onde: ΔP_G^+ e ΔP_G^- - variáveis relativas aos incrementos positivo e negativo do estado nominal de geração, respectivamente.

ρ_i e μ_i - grandezas escalares positivas que representam a inclinação dos segmentos.

γ_i - penalidades das cargas, podendo ser representadas por rampas cujas inclinações γ_i , $i = 1, 2, \dots, n_\ell$ são grandezas escalares positivas.

As penalidades das cargas são 50 a 100 vezes maior que as penalidades dos geradores [18], dando assim a prioridade para a solução do problema de sobrecarga através da realocação de geração, utilizando como último recurso o alívio de carga.

Sendo ΔP_{Li} , um incremento negativo pela própria característica de ser corte de carga, deve-se então ajustá-lo, de modo a adequá-lo à solução padrão do problema de programação linear que deve ser sempre maior ou igual a zero.

$$\Delta P_{Li} = -\Delta P'_{Li}, \quad i = 1, 2, \dots, n_\ell. \quad (3.4.3)$$

Para o caso de várias contingências a função objetivo é a mesma que para uma contingência, mudando apenas o número de restrições.

Da figura (3.3), tira-se que:

$$\Delta P_{Gi} = \Delta P^+_{Gi} - \Delta P^-_{Gi}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (3.4.4)$$

3.5 - Outras Restrições

3.5.1 - Restrição de Balanço de Potência

Sabendo-se que a soma das cargas deve ser balanceada pela soma das gerações e desprezando-se as perdas na transmissão [2,18,23] tem-se:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Li} = 0 \quad (3.5.1)$$

Seja P_{Gi}^0 e P_{Li}^0 as gerações e cargas iniciais do sistema, as variações destas variáveis são expressas como:

$$\sum_{i=1}^n (P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}) - \sum_{i=1}^n (P_{Li}^0 + \Delta P_{Li}) = 0 \quad (3.5.2)$$

Fazendo-se a equação acima em função das variáveis incrementais, tem-se:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \Delta P_{Gi} - \sum_{i=1}^n \Delta P_{Li} = 0 \quad (3.5.3)$$

Observa-se que o somatório em relação a ΔP_G é feito até $n-1$, pelo fato da n -ésima máquina ser tida como referência. Tem-se portanto, na equação (3.5.3) que os

acrêscimos de geração devem atender aos acrêscimos de carga. A diferença devido às perdas deve ser absorvida pela máquina de referência.

Substituindo-se (3.4.4) e (3.4.3) em (3.5.3) tem-se:

$$\sum_{i=1}^{n-1} (\Delta P_{Gi}^{+} - \Delta P_{Gi}^{-}) + \sum_{i=1}^n \Delta P_{Li}' = 0 \quad (3.5.4)$$

3.5.2 - Restrição dos Limites de Geração de Potência Ativa

A restrição para potência ativa pode ser vista como:

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \quad (3.5.5)$$

Os limites superiores e inferiores das restrições acima, são impostos de acordo com as características de operação e podem ser determinados em função da máxima carga que pode ser suprida por um gerador, da reserva girante, problemas de cavitação, etc.

Tomando-se (3.5.5) em função de ΔP_{Gi} , e tendo-se P_{Gi}^0 como o estado nominal de operação [2], tem-se:

$$\underline{P}_{Gi} - P_{Gi}^0 \leq \Delta P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} - P_{Gi}^0 \text{ para } i=1, \dots, n-1. \quad (3.5.6)$$

onde: \overline{P}_{Gi} e \underline{P}_{Gi} - potência máxima e mínima de geração

Separando-se ΔP_{Gi} em parcelas ΔP_{Gi}^+ e ΔP_{Gi}^- tem-se:

$$0 \leq P_{Gi}^+ \leq \overline{P}_{Gi} - P_{Gi}^0 \quad (3.5.7)$$

$$0 \leq P_{Gi}^- \leq P_{Gi}^0 - \underline{P}_{Gi} \quad (3.5.8)$$

3.5.3 - Restrição de Carga

A restrição para a carga ativa pode ser expressa matematicamente [2,5] como:

$$0 \leq P_{Li}^0 \leq \overline{P}_{Li} \quad (3.5.9)$$

onde: P_{Li}^0 - carga ativa nominal da i-ésima barra

Transformando-se (3.5.9) em função dos incrementos nas cargas, tem-se:

$$-\overline{P}_{Li} \leq \Delta P_{Li} \leq 0 \quad \text{para } i=1,2,..,n_l. \quad (3.5.10)$$

Substituindo-se (3.4.3) em (3.5.10), tem-se:

$$0 \leq \Delta P_{Li}' \leq P_{Li}^0 \quad (3.5.11)$$

3.5.4 - Restrição de Estabilidade Transitória

A restrição de estabilidade transitória foi desenvolvida no item 3.3 e descrita como (3.3.30):

$$R_i^t \Delta P_G + S_i^t \Delta P_L = b \quad (3.5.12)$$

onde: $i = 1, 2, \dots$, número de contingências simuladas.

Com esta restrição, no caso de um sistema que se encontra em sobrecarga consegue-se atingir um índice de segurança desejado, resolvendo-se o problema de programação linear acima.

Se o sistema após o redespacho de geração e/ou alívio de carga apresentar um índice de estabilidade menor que o desejado, neste caso o sistema será ainda mais seguro. Então pode-se anunciar a restrição como: Encontrar uma solução, de modo que o índice de estabilidade não ultrapasse um determinado valor desejado, com isso tem-se a seguinte restrição

$$R_i^t \Delta P_G + S_i^t \Delta P_L \leq b \quad (3.5.13)$$

Substituindo-se (3.4.3) e (3.4.4) em (3.5.13)

obtem-se:

$$R_i^t \cdot \Delta P_G^+ - R_i^t \cdot \Delta P_G^- - S_i^t \cdot \Delta P_L' \leq b \quad (3.5.14)$$

3.6 - Métodos de Solução Primal e Dual

O problema geral de programação linear pode ser formulado em qualquer uma das duas formas a seguir:

Primal

$$\text{Min } cx$$

$$\text{s.a } Ax \geq b$$

$$x \geq 0 \quad (3.6.1)$$

onde: A ($m \times n$) - matriz de coeficientes constantes

x - vetor solução de dimensão n

b - vetor constante de dimensão m

c - vetor de custos (ou penalidades) de dimensão n

Dual

$$\text{Max } by$$

$$\text{s.a } A^T y \leq c$$

$$y \geq 0 \quad (3.6.2)$$

onde: y - vetor solução de dimensão m

Então, x é a variável do problema primal e y é

a variável do problema dual.

Neste trabalho o problema primal tem a seguinte forma:

$$\text{Min } cx$$

$$\text{s.a } Ax \leq b_1$$

$$0 \leq x \leq b_2 \quad (3.6.3)$$

onde: b_2 - limite superior para as variáveis

Com a introdução de variáveis de folga d e f para cada restrição com limite superior [19,20], o problema primal (3.6.3) fica:

$$\text{Min } cx$$

$$\text{s.a } Ax + d = b_1$$

$$x + f = b_2$$

$$x \geq 0, \quad d \geq 0, \quad f \geq 0 \quad (3.6.4)$$

Com a aplicação do método primal a grandes sistemas e considerando-se um conjunto de contingências, o número de restrições cresce consideravelmente, tornando-se muito penosa e demorada a obtenção da solução primal, obtida através do método simplex. Por estas razões foi proposto neste trabalho a utilização do método dual.

Considerando-se o problema primal na forma da tabela 3.1, o dual terá a forma apresentada na tabela 3.2.

<div><div></div><div>≥ 0</div><div></div></div>					
	x_1	x_2	\dots	x_n	
	c_1	c_2	\dots	c_n	
					Min.
1	A				b_1
2					b_2
\vdots					\vdots
\vdots					\vdots
m					b_m

(PRIMAL)

TABELA - 3.1

<div> <div></div> <div>≥ 0</div> <div></div> </div>					
	y_1	y_2	\dots	y_m	
	$-b_1$	$-b_2$	\dots	$-b_m$	
					Máx.
1	$-A^T$				c_1
2					c_2
\vdots					\vdots
\vdots					\vdots
n					c_n

(DUAL)

TABELA - 3.2

Analisando-se as tabelas 3.1 e 3.2 pode-se comentar que:

- a) A função objetivo do dual é de maximização, ao passo que a do primal é de minimização.
- b) Os termos constantes das restrições do dual são os coeficientes da função objetivo do primal e vice-versa.
- c) O número de incógnitas do dual (m valores de y) é igual ao número de restrições do primal e vice-versa.
- d) A matriz dos coeficientes do dual é a transposta da matriz dos coeficientes do primal, com inversão de sinal de todos os seus elementos.
- e) Os coeficientes b_1, b_2, \dots, b_m tem os seus sinais trocados na função objetivo do dual.

De acordo com a tabela 3.2, a forma usual padrão do dual (3.6.4) fica:

$$\text{Max } -b^T y$$

$$\text{s.a } -A^T y + g = c$$

$$-y + h = c$$

$$y \geq 0, \quad g \geq 0, \quad h \geq 0 \quad (3.6.5)$$

onde: g e h - variáveis de folga

O problema agora é encontrar a solução x do primal através da resolução do dual. Obtém-se a solução, usando-se o teorema da folga complementar [19,20,21] .

Seja o problema dual representado pela tabela 3.3:

	y_1	y_2	...	y_m	y_{m+1}	y_{m+2}	...	y_{m+n}		
1	$-b_1$	$-b_2$...	$-b_m$	0	0	...	0	0	(0)
0	$-a_{11}$	$-a_{21}$		$-a_{m1}$	1	0	...	0	c_1	(1)
0	$-a_{12}$	$-a_{22}$		$-a_{m2}$	0	1	...	0	c_2	(2)
.
.
.
0	$-a_{1n}$	a_{2n}	...	$-a_{mn}$	0	0	...	1	c_n	(n)

TABELA - 3.3

onde: y_j ($j=1,2,\dots,m$) - variáveis do dual

y_{m+i} ($i=1,2,\dots,n$) - variáveis de folga das equações
1,2,...,n, respectivamente.

O problema primal terá também $m + n$ variáveis subdivididas em dois grupos:

x_i ($i=1,2,\dots,n$) - variáveis do primal

x_{n+j} ($j=1,2,\dots,m$) - variáveis de folga do primal

Depois de algumas iterações do método simplex, a

tabela 3.3 se transformará em:

y_1	y_2	...	y_m	y_{m+1}	y_{m+2}	...	y_{m+n}	
$p_j - b_j$				p_{m+i}			Z	(0)
								(1)
								(2)
								.
								.
								(m)

TABELA - 3.4

onde: p_j - quantidade líquida acrescentada ao coeficiente $-b_j$ ($j=1,2,\dots,m+n$) da linha (0) da tabela 3.3, para se obter a linha (0) da tabela 3.4.

Obtida pelo método simplex, a solução ótima do dual, então o teorema da folga complementar [19,20,21] diz que:

- a) "O valor ótimo da variável x_i do primal é igual ao coeficiente na linha (0) ótima, da variável de folga y_{m+i} do dual", isto é:

$$x_i^* = p_{m+i}^* \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3.6.6)$$

- b) "O valor ótimo da variável de folga x_{n+j} do primal é

igual ao coeficiente na linha (0) ótima, da variável y_j do dual", isto é:

$$x_{n+j}^* = p_j^* - b_j \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (3.6.7)$$

Deve-se ressaltar que o dual do dual é o primal.

3.7 - Algoritmo para a melhoria da segurança de um sistema de potência sujeito a n contingências

Apresenta-se a seguir na figura 3.4 , o fluxograma do algoritmo proposto para a análise da estabilidade transitória e melhoria da segurança em sistemas de potência.

O procedimento apresentado pode ser descrito através dos seguintes passos:

- 1 - Determinação do ponto de equilíbrio estável pré-falta.
- 2 - Simulação do primeiro defeito e obtenção do ponto de equilíbrio pós-defeito.
- 3 - Verifica-se se o ponto de equilíbrio pós-defeito pertence ao conjunto L definido em (2.2.2).

não - nada se afirma sobre a estabilidade e para-se o processamento da simulação do tal defeito e passa-se para a próxima contingência.

sim - continua-se o processamento.

- 4 - Reduz-se o sistema às barras internas de geração e obtém-se a matriz de admitância reduzida da rede. Esta redução pode ser obtida através de operações matriciais, acrescentando-se as n barras internas dos geradores, transformando-se todas as cargas em admitâncias constantes, admitindo-se assim que todas as barras possuem injeções nulas, salvo as barras internas dos geradores. Então a matriz de admitância de barra pode ser particionada como mostra-se a seguir [2,24] .

$$Y_{\text{barra aumentada}} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nr} \\ Y_{rn} & Y_{rr} \end{bmatrix} \quad (3.7.1)$$

onde: n - representa as barras internas de geração
 r - barras restantes do sistema

Então a matriz reduzida é determinada por:

$$Y_{\text{reduzida}} = Y_{nn} - Y_{nr} Y_{rr}^{-1} Y_{rn} \quad (3.7.2)$$

- 5 - Calcula-se o valor da energia potencial inicial do sistema no instante da eliminação da falta, fazendo-se a seguinte mudança de variável $z_{ij} = \alpha_{ij} - \alpha_{ij}^e$ para $i, j = 1, 2, \dots, n-1$; $j \neq i$

onde: α_{ij} - equilíbrio pré-defeito

α_{ij}^e - equilíbrio pós-defeito

- 6 - Inicia-se o procedimento para a determinação do domínio de estabilidade.
- 7 - Testa-se o índice de estabilidade calculado com o índice de estabilidade desejado, se o calculado for menor ou igual ao desejado e não havendo mais contingências a simular e também o número de sobrecargas igual a zero, assume-se então a estabilidade, caso contrário executa-se o passo seguinte.
- 8 - Monta-se a restrição de estabilidade transitória para todas as contingências consideradas ou só para as contingências que acarretarem sobrecarga.
- 9 - Finalizando-se a simulação de contingências, inicia-se o processo da melhoria da segurança usando-se o problema de programação linear dual proposto, considerando-se as restrições de estabilidade transitórias definidas no passo anterior e obtendo-se assim um novo ponto de operação para o sistema. Faz-se novamente a simulação das contingências, repetindo-se os procedimentos acima até que seja assumida a estabilidade.

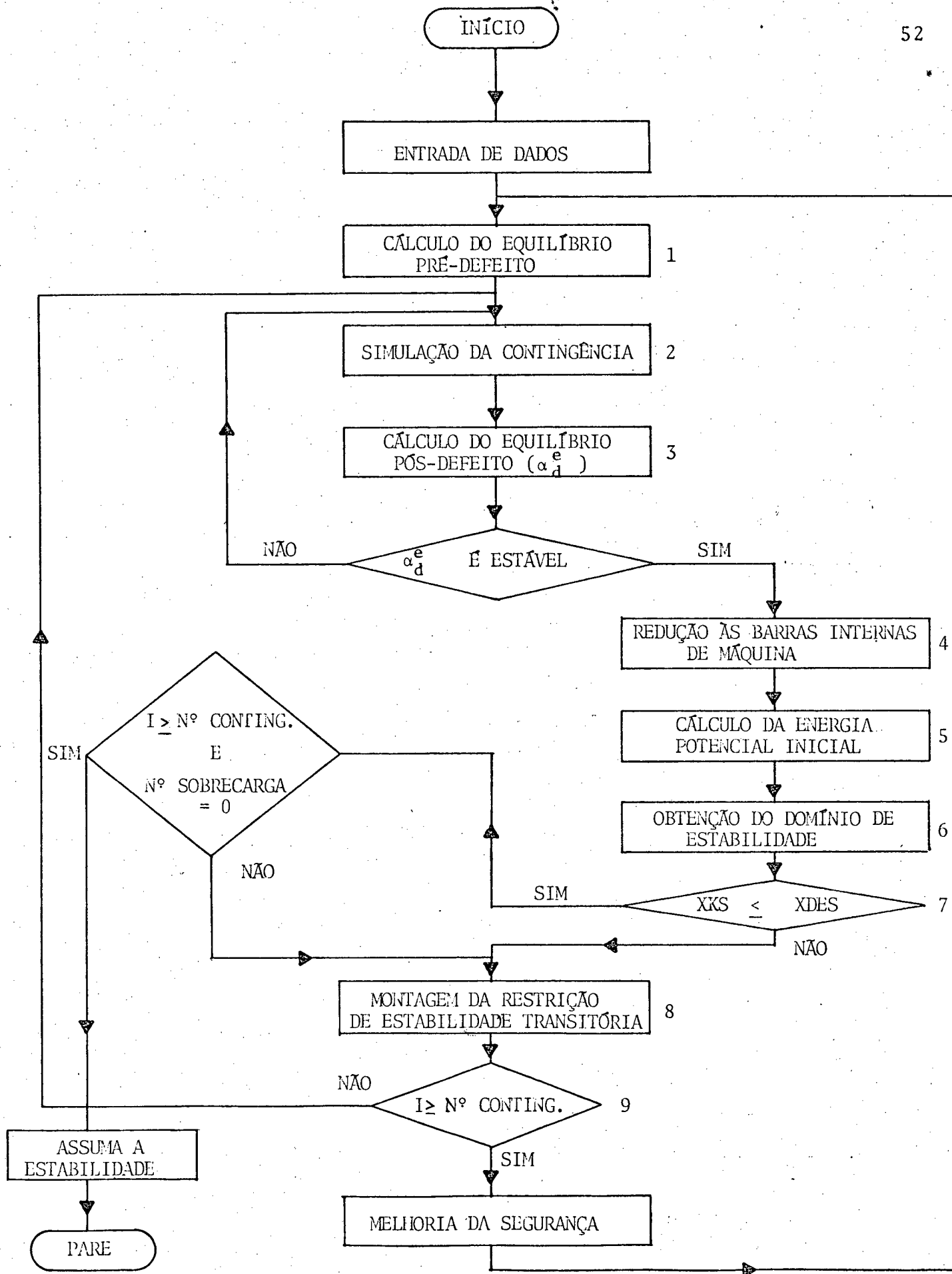


Figura 3.4 - Fluxograma do Algoritmo para a Análise de estabilidade Transitória e Melhoria da Segurança em Sistema de Potência

3.8 - Fator de Aceleração

É possível aumentar consideravelmente o processo de convergência do algoritmo proposto, usando-se um fator de aceleração, "fa", cujo efeito no processo iterativo do método proposto é semelhante ao do ganho de malha num servomecanismo.

Com o uso do fator de aceleração, a restrição de estabilidade transitória (3.5.12) fica:

$$R_i^t \Delta P_G + S_i^t \Delta P_L \leq b' \quad (3.8.1)$$

onde b' é calculado em função de ξ' .

$$\xi' = fa \cdot \xi \quad (3.8.2)$$

Observa-se então que o fator de aceleração, "fa" afeta o ξ de modo que tudo se passa como se o ξ desejado fosse ξ' . Assim passa-se a denominar ξ' de fator de aceleração FA.

Utiliza-se então o algoritmo proposto substituindo-se ξ por $\xi' = FA$ e, a cada iteração deste, compara-se o índice de estabilidade com ξ desejado. Se o pior índice de estabilidade for menor que o desejado para-se o processamento.

Na tabela 3.5 mostra-se a influência do fator de aceleração em um sistema com 10 máquinas, 45 barras e 72 linhas. Neste caso, considera-se o índice de estabilidade $\xi = 0.93$, o algoritmo não converge em 20 iterações. No entanto, utilizando-se um fator de aceleração tal que $FA = \xi' = 0.4$ o algoritmo convergiu em 4 iterações fornecendo um índice de estabilidade de 0.880, menor que 0.93 e, portanto seguro.

O ponto de operação sofre influência no procedimento proposto com o fator de aceleração considerado, mas conforme será comentado, não há grande variação nos valores dos ângulos ou variações das injeções quando se adota o procedimento proposto acima. Além disso o erro cometido age no sentido da segurança.

FA Iteração	0.93	0.7	0.5	0.4
1	1.270	1.270	1.270	1.270
2	1.230	1.190	1.130	1.080
3	1.200	1.130	1.020	0.970
4	1.170	1.070	0.970	0.880
5	1.150	1.030	0.910	-
6	1.130	1.000	-	-
7	1.110	0.970	-	-
8	1.090	0.950	-	-
9	1.070	0.930	-	-
10	1.060	0.920	-	-
11	1.050	-	-	-
12	1.040	-	-	-
13	1.030	-	-	-
14	1.020	-	-	-
15	1.010	-	-	-
16	1.006	-	-	-
17	1.001	-	-	-
18	0.998	-	-	-
19	0.995	-	-	-
20	0.992	-	-	-

Tabela 3.5 Número de Iterações em Função do Fator de Aceleração

3.9 - Conclusão

Como o problema considerado consiste em obter um ponto de operação seguro, de tal modo que o sistema possa ser submetido à várias contingências, tipo retirada de linha, permanecendo sempre seguro, mostrou-se que uma solução deste problema consiste em encontrar um ponto de operação, de maneira que o ponto de equilíbrio pré-defeito pertença à intersecção de todos os domínios de estabilidade dos pontos de equilíbrio sob contingência, ou seja pós-defeito.

Foi reapresentada a formulação de uma restrição de estabilidade transitória [2], função de um índice de estabilidade especificado para o sistema.

Foram usadas para a solução do problema de sobrecarga, técnicas de otimização através da programação linear, com uso dos métodos simplex primal e dual, extremizando-se assim uma função objetivo, construída com base em penalidades de custos relativos às máquinas e cargas do sistema. Esta função foi construída considerando-se [2,18] aproximações lineares, de maneira que se minimize o desvio do estado nominal de geração e o corte de carga.

Foram reformuladas também as restrições de balanço de potência, de limites de geração, de potência ativa e de carga.

Introduziu-se um algoritmo que possibilita a eliminação de sobrecargas, sob o ponto de vista da estabilidade transitória, em sistemas de potência, utilizando-se a formulação dual do problema de programação linear, tendo em vista a consideração de um conjunto de contingências a ser satisfeito.

Foi proposto também um fator de aceleração que

melhora o processo de convergência para a obtenção do índice de estabilidade desejado.

O capítulo seguinte ilustra a utilização do procedimento e algoritmo proposto.

C A P Í T U L O I V

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - Introdução

Neste capítulo apresentam-se os testes do algoritmo de diminuição de sobrecargas relativas à estabilidade de um sistema sob várias contingências.

Obtêm-se resultados do sistema usando-se o método simplex primal e dual de programação linear, respectivamente.

O programa computacional desenvolvido é testado em 4 exemplos e realizados em um computador IBM 4341.

4.2 - Exemplo 1 - 3 Geradores

Este sistema foi obtido de [7] e é constituído de 3 geradores, 9 barras, 3 transformadores e 6 linhas de transmissão. O diagrama unifilar é ilustrado na figura 4.1. As condições de operação, parâmetros de linhas e transformadores, parâmetros dos rotores, limites de geração e penalidades da função objetivo, são apresentados nas tabelas 4.1 a 4.4.

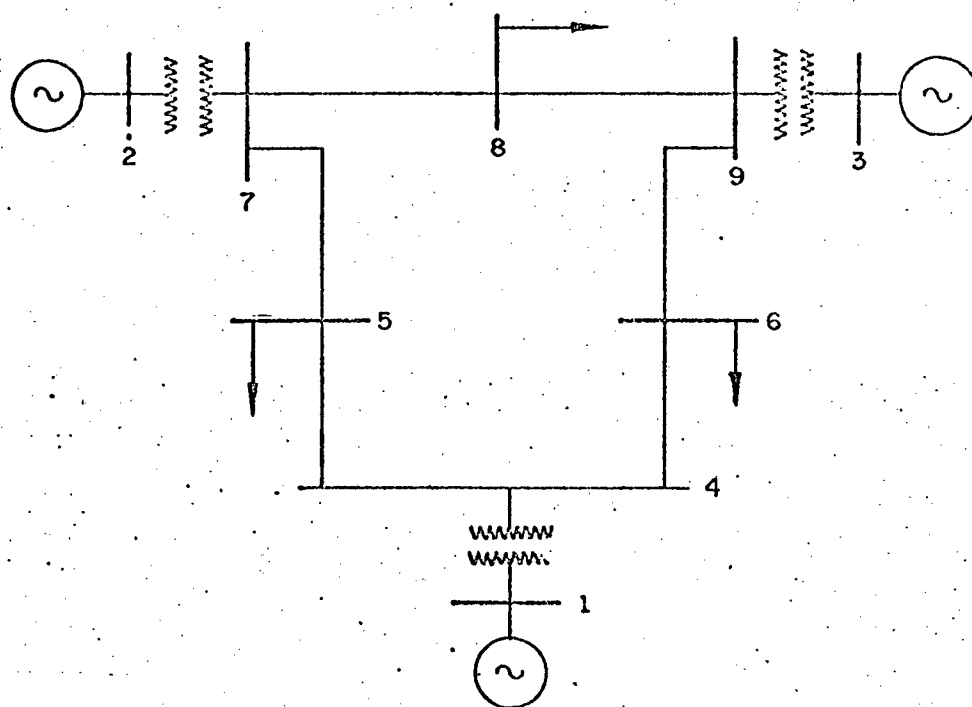


Figura 4.1 : Diagrama Unifilar do Sistema de 3 Geradores

D A D O S D E B A R R A S							
BARRA NUM. INT	NOME	BARRA NUM. EXT	GERAÇÃO ATIVA MW	GERAÇÃO REATIVA MVAR	CARGA ATIVA MW	CARGA REATIVA MVAR	CAPACITOR OU REATOR MVAR
1	BARRA1	301	82.598	0.0	0.0	0.0	0.0
2	BARRA2	302	192.264	0.0	0.0	0.0	0.0
3	BARRA3	303	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	BARRA4	304	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0
5	BARRA5	305	0.0	0.0	142.360	57.000	0.0
6	BARRA6	306	0.0	0.0	142.060	32.000	0.0
7	BARRA7	307	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0
8	BARRA8	308	0.0	0.0	111.400	47.000	0.0
9	BARRA9	309	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0

Tabela 4.1 : Condições de Operação para o Sistema de 3 Geradores

D A D O S D E L I N H A S E T R A N S F O R M A D O R E S							
LINHA	DA BARRA INT	PARA BARRA INT	LA EAFRA EXT	PARA BARRA EXT	RESISTENCIA SERIE POR CENTO	REATANCIA SERIE POR CENTO	CARREGAMENTO CAPACITIVO MVAR
1	1	4	301	304	0.0	5.760	0.0
2	2	7	302	307	0.0	6.250	0.0
3	3	9	303	309	0.0	5.860	0.0
4	4	5	304	305	1.140	10.280	17.600
5	4	6	304	306	1.950	10.740	15.800
6	5	7	305	307	3.200	16.100	30.600
7	6	9	306	309	3.200	16.600	35.800
8	7	8	307	308	0.850	7.200	12.900
9	8	9	308	309	1.350	11.200	20.000

Tabela 4.2 : Parâmetros de Linhas e Transformadores para o Sistema de 3 Geradores (base 100 MVA)

D A D O S D E S R O T O R E S		
BARRA NUM. INT	BARRA NUM. EXT	REATANCIA TRANSITORIA POR CENTO
1	301	6.080
2	302	11.580
3	303	18.130

Tabela 4.3 : Parâmetros de Rotores para o Sistema de 3 Geradores (base 100 MVA) (máquina de referência)

LIMITES DE GERACAO E PENALIDADES DA FUNCAO OBJETIVO DE GERACAO E CARGA					
BARRA NUM. INT	FMAX MW	FMIN MW	DELTA	RO	GAMA
1	152.000	50.000	20.00	20.00	-
2	250.000	70.000	20.00	20.00	-
3	0.0	0.0	0.0	0.0	-
4	-	-	-	-	500.00
5	-	-	-	-	1.00
6	-	-	-	-	50.00
7	-	-	-	-	500.00
8	-	-	-	-	100.00
9	-	-	-	-	500.00

Tabela 4.4 : Limites de Geração e Penalidades da Função Objetivo

4.2.1 - Método Primal

Na tabela 4.5 apresenta-se a primeira etapa do algoritmo usado neste trabalho, onde são testadas 6 contingências, independentes entre si. Nesta etapa mostra-se o estado nominal do sistema, mostrando-se também o índice de estabilidade calculado. Observa-se a potência de geração alocada para a barra de folga, através de um fluxo de carga AC. A barra de folga é neste caso a barra de geração 3.

Nota-se que, exigindo-se um índice de estabilidade 0.70 ou melhor, uma margem de segurança de 30 %, apenas as contingências 6,7,8 apresentam sobrecarga. Portanto é necessário obter-se através da realocação de geração e/ou alívio de carga, um novo ponto de operação o qual pertença à interseção dos domínios de estabilidade de todas as contingências e que tenha a margem de segurança desejada. Este novo ponto é obtido através da programação linear, fazendo-se uso do método simplex primal inicialmente.

Na tabela 4.6 mostra-se o despacho inicial e os resultados dos despachos a cada iteração do algoritmo proposto. Observa-se que houve a cada iteração decréscimos de geração nas barras 2 e 3, e um decréscimo de carga na barra 5. As potências nas demais barras permaneceram constantes.

Na tabela 4.7 é mostrado o índice de estabilidade calculado a partir do despacho inicial e dos demais despachos a cada iteração. A tabela mostra apenas o índice de estabilidade da contingência mais crítica, que é a contingência 7. Verifica-se pela tabela que em 2 iterações obteve-se o ponto de operação com o índice de estabilidade desejado de 0.70.

*** SISTEMA EXEMPLO 3 MAQUINAS 9 BARRAS 9 LINHAS ***
 BARRA DE FOLGA = 3
 INDICE DE ESTABILIDADE DESEJADO = 0.70
 FATOR DE ACELERAÇÃO = 0.70
 CONTINGENCIAS = 4 5 6 7 8 9
 PROGRAMACAO LINEAR COM USO DO METODO SIMPLEX PRIMAL

RETIRADA DA LINHA 4. ADM. SERIE = 1.06564 -9.60945 . ADM. SHUNT = 0.0 0.17600

BARRA	GERACAO	ALFA PFE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z * (RADIANOS)	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.33257	-0.22650	-0.10608	0.01656	1.26472	0.96690	0.01310
2	1.92264	0.06883	-0.01443	0.00326				
3	1.30301							

RETIRADA DA LINHA 5. ADM. SERIE = 1.63659 -9.01385 . ADM. SHUNT = 0.0 0.15800

BARRA	GERACAO	ALFA PFE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z * (RADIANOS)	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.33257	-0.10883	-0.22375	0.07577	1.70525	0.95557	0.04443
2	1.92264	0.06883	0.15468	-0.08585				
3	1.30301							

RETIRADA DA LINHA 6. ADM. SERIE = 1.18760 -5.97513 . ADM. SHUNT = 0.0 0.30600

BARRA	GERACAO	ALFA PFE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z * (RADIANOS)	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.33257	-0.71658	0.38400	0.18558	0.12750	-0.45554	1.45554
2	1.92264	0.06883	0.24525	-0.17643				
3	1.30301							

RETIRADA DA LINHA 7. ADM. SERIE = 1.11966 -5.80826 . ADM. SHUNT = 0.0 0.35800

BARRA	GERACAO	ALFA PFE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z * (RADIANOS)	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.33257	-0.91666	0.58408	0.37442	0.17342	-1.15905	2.15905
2	1.92264	0.06883	-0.19310	0.26199				
3	1.30301							

RETIRADA DA LINHA 8. ADM. SERIE = 1.61712 -13.69798 . ADM. SHUNT = 0.0 0.12900

BARRA	GERACAO	ALFA PFE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z * (RADIANOS)	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.33257	-0.13181	-0.20077	0.28020	0.33205	0.15615	0.84385
2	1.92264	0.06883	0.50243	-0.43360				
3	1.30301							

RETIRADA DA LINHA 9. ADM. SERIE = 1.06080 -8.80071 . ADM. SHUNT = 0.0 0.20000

BARRA	GERACAO	ALFA PFE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z * (RADIANOS)	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.33257	-0.42237	0.08980	0.04493	0.73202	0.04025	0.05975
2	1.92264	0.06883	-0.10817	0.17700				
3	1.30301							

Tabela 4.5 : Primeira Etapa do Processo Iterativo do Algoritmo
 Proposto usando o Método Primal

Iteração Barras	INICIAL	1º	2º
Geração			
1	0.82598	0.82598	0.82598
2	1.92264	1.65319	1.28873
3	1.30301	1.27703	1.25175
Carga			
4	0.001	0.001	0.001
5	1.4236	1.1497	0.7802
6	1.4206	1.4206	1.4206
7	0.001	0.001	0.001
8	1.1140	1.1140	1.1140
9	0.001	0.001	0.001

Tabela 4.6 : Resultados dos Despachos a cada Iteração (pu)

Iteração	Índice de Est. Calculado
Inicial	2.15905
1	1.19261
2	0.62052

Tabela 4.7 : Índice de Estabilidade Proveniente dos Despachos Resultantes a cada Iteração

A tabela 4.8 apresenta a última etapa do processo iterativo do algoritmo proposto. Nesta fase são testadas novamente as 6 contingências para verificar-se o índice do ponto de operação encontrado na segunda iteração do algoritmo.

Finalmente na tabela 4.9 tem-se o ponto de operação final onde todas as restrições impostas, inclusive a de segurança, foram satisfeitas. Observa-se que de acordo com o carregamento inicial do sistema, para obter-se a segurança desejada, houve necessidade de acréscimos e decréscimos de geração em determinadas barras, e decréscimo de carga na barra 5. Mostra-se também a variação total de potência de geração e de potência de carga ativa e reativa em relação ao ponto de operação inicial.

O corte de carga reativa neste trabalho foi obtido e está de acordo com | 2 | e | 18 |, onde se usa um critério para a determinação do corte de carga reativa em função do corte de carga ativa.

RETIRADA DA LINHA 4. ADM. SERIE = 1.06564 -9.60945 , ADM. SHUNT = 0.0 0.17000

BARRA	GERACAO	ALFA PRE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z *	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.27194	-0.21403	-0.05791	0.00470	1.53964	0.99694	0.00306
2	1.28873	-0.05913	-0.10038	0.04143				
3	1.25175							

RETIRADA DA LINHA 5. ADM. SERIE = 1.63659 -9.01385 , ADM. SHUNT = 0.0 0.15300

BARRA	GERACAO	ALFA PRE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z *	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.27194	0.00773	-0.27967	0.12277	1.98759	0.93823	0.06177
2	1.28873	-0.05913	0.04850	-0.10763				
3	1.25175							

RETIRADA DA LINHA 6. ADM. SERIE = 1.18760 -5.97513 , ADM. SHUNT = 0.0 0.30500

BARRA	GERACAO	ALFA PRE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z *	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.27194	-0.45210	0.18716	0.04511	0.66376	0.93203	0.06797
2	1.28873	-0.05913	0.04160	-0.10074				
3	1.25175							

RETIRADA DA LINHA 7. ADM. SERIE = 1.11956 -5.80826 , ADM. SHUNT = 0.0 0.35800

BARRA	GERACAO	ALFA PRE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z *	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.27194	-0.71094	0.43900	0.23077	0.37565	0.38568	0.61432
2	1.28873	-0.05913	-0.25650	0.19737				
3	1.25175							

RETIRADA DA LINHA 8. ADM. SERIE = 1.61712 -13.69798 , ADM. SHUNT = 0.0 0.12900

BARRA	GERACAO	ALFA PRE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z *	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.27194	-0.09631	-0.17563	0.20516	0.52212	0.60706	0.39294
2	1.28873	-0.05913	0.30335	-0.36248				
3	1.25175							

RETIRADA DA LINHA 9. ADM. SERIE = 1.06080 -8.80071 , ADM. SHUNT = 0.0 0.20300

BARRA	GERACAO	ALFA PRE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA * Z *	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.
X---X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X	X-----X
1	0.82598	-0.27194	-0.40175	0.12981	0.08855	0.50945	0.82619	0.17381
2	1.28873	-0.05913	-0.30530	0.24617				
3	1.25175							

Tabela 4.8 : Última Etapa do Processo Iterativo do Algoritmo
Proposto usando o Método Primal

P O N T O D E O P E R A C A O F I N A L													
BARRA		BARRA	G E R A D O R		C A R G A		CAPACITOR	V A R I A C A O D E G E R A D O R		V A R I A C A O D E C A R G A			
NÚM.	NOME	NÚM.	ATIVA	REATIVA	ATIVA	REATIVA	CU REATOR	ATIVA	REATIVA	ATIVA	REATIVA		
INT.		EXT.	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR		
1	BARRA1	301	82.598	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
2	BARRA2	302	128.870	0.0	0.0	0.0	0.0	-63.394	0.0	0.0	0.0		
3	BARRA3	303	125.155	6.876	0.0	0.0	0.0	125.156	6.876	0.0	0.0		
4	BARRA4	304	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
5	BARRA5	305	0.0	0.0	75.020	31.239	0.0	0.0	0.0	-64.340	-25.761		
6	BARRA6	306	0.0	0.0	142.060	32.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
7	BARRA7	307	0.0	0.0	0.101	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
8	BARRA8	308	0.0	0.0	111.400	47.030	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
9	BARRA9	309	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tabela 4.9 : Ponto de Operação Final usando o Método Primal

4.2.2 - Método Dual

Os resultados obtidos com a aplicação do método dual não são repetidos aqui uma vez que, neste exemplo, tanto os resultados quanto o número de iterações são idênticos àqueles obtidos pelo método primal devido à dimensão do problema em questão.

4.3 - Exemplo 2 - 4 Geradores

Este sistema foi obtido de [6.15] e é constituído de 4 geradores, 9 barras e 7 linhas de transmissão. O diagrama unifilar é ilustrado na figura (4.2). As condições de operação, parâmetros de linhas, parâmetros dos rotores, limites

de geração e penalidades da função objetivo, estão apresentados nas tabelas 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13.

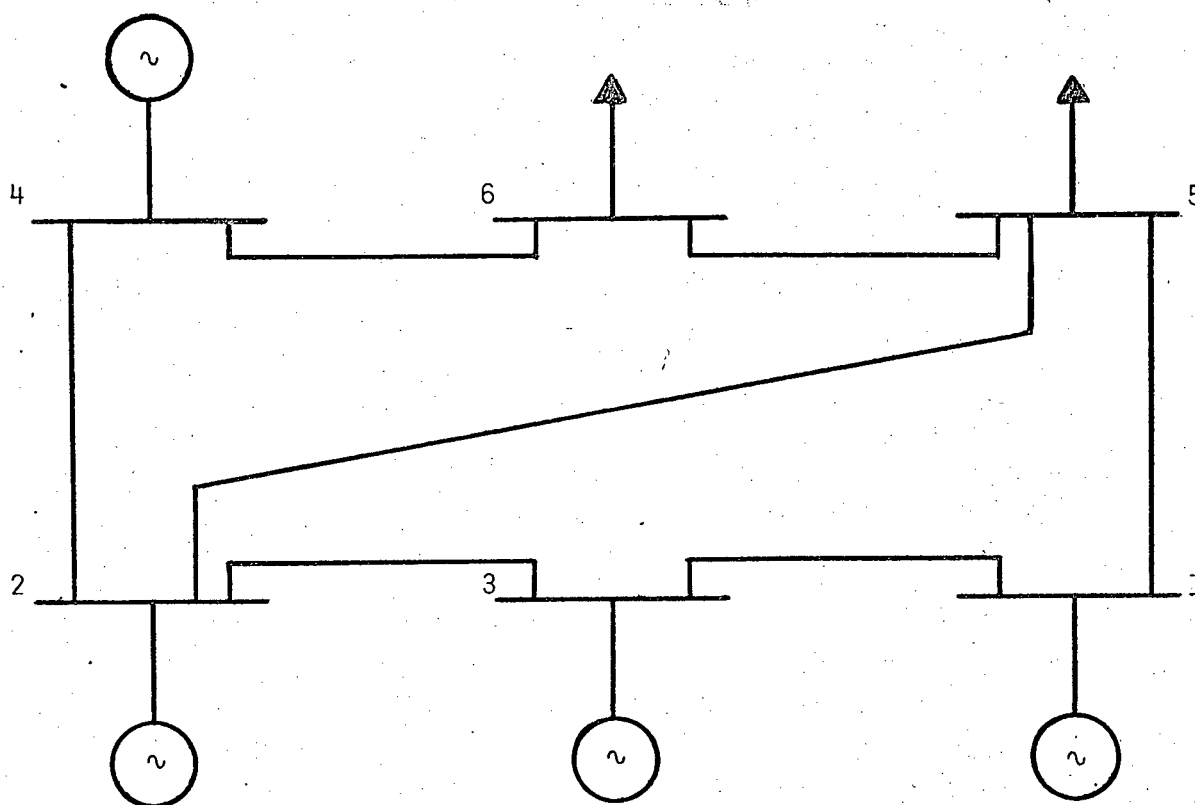


Figura 4.2 : Diagrama Unifilar do Sistema de 4 Geradores

*** SISTEMA EXEMPLO 3 MAQUINAS 6 BARRAS 7 LINHAS ***
BARRA DE FOLGA = 3

D A D O S D E B A R R A S							
BARRA NUM. INT	NOME	BARRA NUM. EXT	GERAÇÃO ATIVA MW	REATIVA MVAR	CARGA ATIVA MW	REATIVA MVAR	CAPACITOR OU REATOR MVAR
1	BARRA1	301	33.200	0.0	0.0	0.0	0.0
2	BARRA2	302	30.000	0.0	0.0	0.0	0.0
3	BARRA3	303	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	BARRA4	304	0.0	0.0	10.000	0.0	0.0
5	BARRA5	305	0.0	0.0	40.000	15.000	0.0
6	BARRA6	306	0.0	0.0	30.000	10.000	0.0

Tabela 4.10 : Condições de Operação para o Sistema de 4 Geradores

D A D O S D E L I N H A S E T R A N S F O R M A D O R E S							
LINHA	DA BARRA INT	PARA BARRA INT	DA BARRA EXT	PARA BARRA EXT	RESISTENCIA SERIE POR CENTO	REATANCIA SERIE POR CENTO	CARREGAMENTO CAPACITIVO MVAR
1	1	4	301	304	5.000	20.000	0.0
2	2	4	302	304	10.000	50.000	0.0
3	3	2	303	302	20.000	80.000	0.0
4	3	5	303	305	10.000	30.000	0.0
5	5	6	305	306	20.000	40.000	0.0
6	6	1	306	301	10.000	15.000	0.0
7	4	5	304	305	20.000	50.000	0.0

Tabela 4.11 : Parâmetros de Linhas para o Sistema de 4 Geradores
(base 100 MVA)

D A D O S D E S R O T O R E S		
BARRA NUM. INT	BARRA NUM. EXT	REATANCIA TRANSITORIA POR CENTO
1	301	40.000
2	302	100.000
3	303	50.000
4	304	0.400

Tabela 4.12 : Parâmetro dos Rotores para o Sistema de 4 Geradores
(base 100 MVA)

LIMITES DE GERACAO E PENALIDADES DA FUNCAO OBJETIVO DE GERACAO E CARGA					
BARRA NUM. INT	P _{MAX} MW	P _{MIN} MW	DELTA	RO	GAMA
1	40.000	10.000	20.00	20.00	-
2	10.000	2.000	20.00	20.00	-
3	40.000	10.000	20.00	20.00	-
4	0.0	0.0	0.0	0.0	-
5	-	-	-	-	100.00
6	-	-	-	-	100.00

Tabela 4.13 : Limite de Geração e Penalidades da Função Objetivo

4.3.1 - Método Primal

Neste exemplo de 4 máquinas usou-se um índice de estabilidade desejado de igual valor ao do fator de aceleração (0.72), de mesmo modo que o exemplo de 3 máquinas anterior. Usa-se neste exemplo o método simplex primal.

A tabela 4.14 mostra os resultados dos despachos ao longo do processo iterativo. Observa-se que houve variação na potência de geração e na potência de carga.

A tabela 4.15 mostra os índices de estabilidade provenientes dos despachos a cada iteração, visto através da análise da contingência mais crítica. Vê-se portanto, pela observação da tabela, que o algoritmo de análise de segurança atingiu em 1 iteração um valor igual a 0.699, menor que o exigido. Obtém-se então o ponto de operação procurado.

Na tabela 4.16 tem-se o ponto de operação encontrado, mostrando-se as variações nas barras de geração e carga.

Dependendo dos custos de geração e penalidades das cargas, é possível encontrar-se diferentes alternativas viáveis para a eliminação de sobrecarga.

Iteração	INICIAL	1º
Barras		
Geração		
1	0.19	0.25209
2	0.08	0.02
3	0.28	0.25012
4	0.05118	0.0747
Carga		
5	0.34	0.34
6	0.24	0.23649

Tabela 4.14 : Resultado dos Despachos a cada Iteração (pu)

Iteração	Índice de Estab. Calculada
INICIAL	1.54503
1	0.69903

Tabela 4.15 : Índices de Estabilidade Provenientes dos Despachos Resultantes a cada Iteração

*** SISTEMA EXEMPLO 4 MACINAS 6 BARRAS 7 LINHAS ***
 BARRA DE FOLGA = .4
 INDICE DE ESTABILIDADE DESEJADO = 0.72
 FATOR DE ACELERACAO = 0.72
 CONTINGENCIAS = 1 2 3 4 5 6 7
 PROGRAMACAO LINEAR COM USO DO METODO SIMPLEX PRIMAL

PONTO DE OPERACAO FINAL											
BARRA NUM. INT.	NOME	BARRA NUM. EXT.	GERACAO ATIVA MV	GERACAO REATIVA MVAR	CARGA ATIVA MV	CARGA REATIVA MVAR	CAPACITOR OU REATOR MVAR	VARIACAO DE GERACAO ATIVA MV	VARIACAO DE GERACAO REATIVA MVAR	VARIACAO DE CARGA ATIVA MV	VARIACAO DE CARGA REATIVA MVAR
1	BARRA1	301	25.209	0.0	0.0	0.0	0.0	6.209	0.0	0.0	0.0
2	BARRA2	302	2.000	0.0	0.0	0.0	0.0	-6.000	0.0	0.0	0.0
3	BARRA3	303	25.012	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.988	0.0	0.0	0.0
4	BARRA4	304	7.470	17.568	0.0	0.0	0.0	7.470	17.568	0.0	0.0
5	BARRA5	305	0.0	0.0	34.000	15.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	BARRA6	306	0.0	0.0	23.649	9.854	0.0	0.0	0.0	-0.351	-0.146

Tabela 4.16 : Ponto de Operação Final usando o Método Primal

4.3.2 - Método Dual

Neste caso usa-se o método de programação linear simplex dual.

As tabelas que mostram os despachos a cada iteração e os índices de estabilidade não foram colocadas devido ao fato de serem iguais às tabelas do método primal. Os comentários também são os mesmos.

A tabela 4.17 que mostra o ponto de operação final foi colocado para a constatação de que o ponto de operação encontrado é o mesmo tanto para o método primal quanto para o dual.

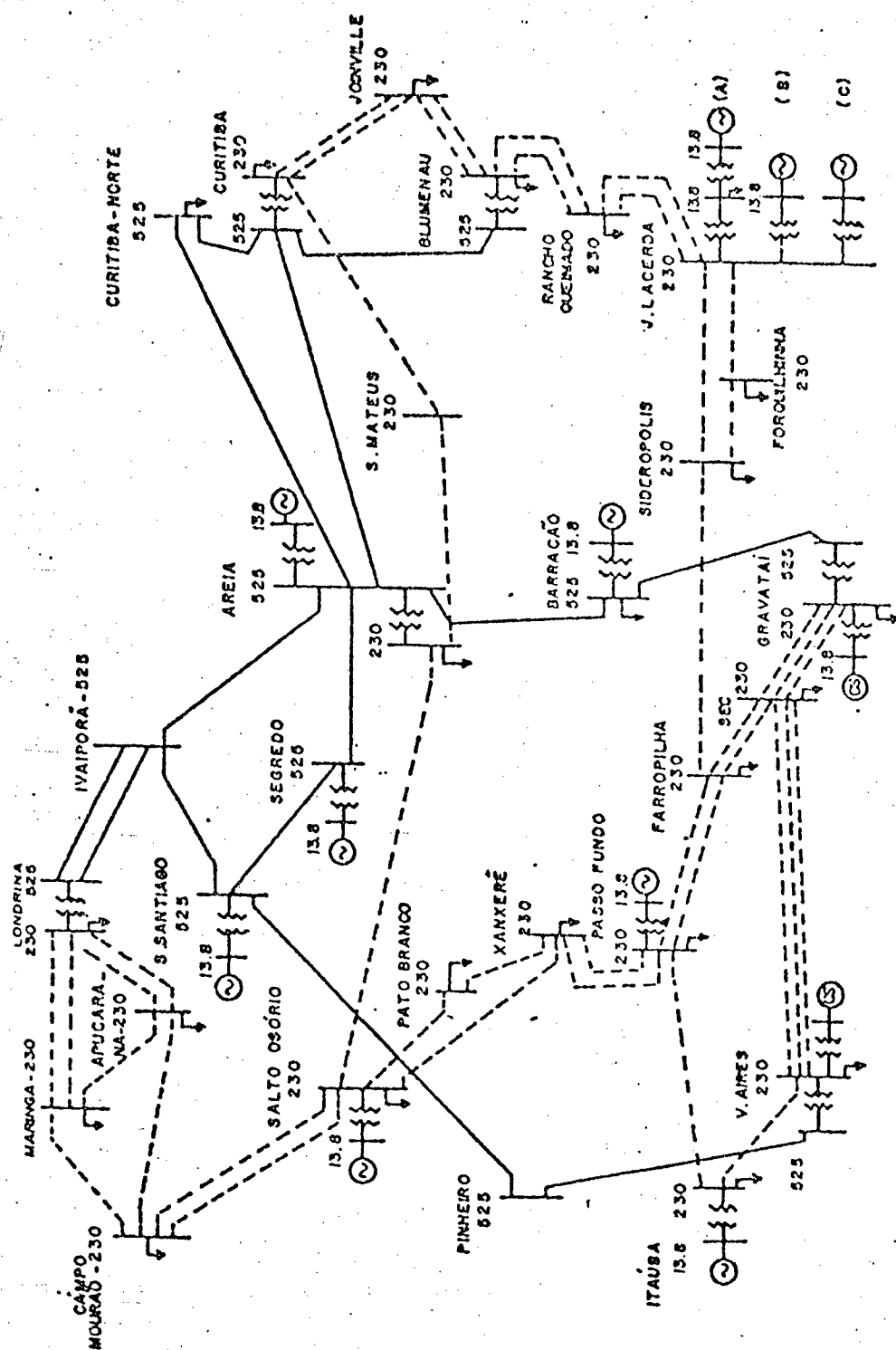


Figura 4.3 : Diagrama Unifilar do Sistema de 10 Geradores

D A D O S D E B A R R A S							
BARRA NUM. INT	NOME	BARRA NUM. EXT	G E R A C A O		C A R G A		CAPACITOR
			ATIVA MV	REATIVA MVAR	ATIVA MV	REATIVA MVAR	CU REATOR MVAR
1	BARRACAO13.8	366	650.000	-26.200	0.0	0.0	0.0
2	P.FUNDO 13.8	369	215.000	70.700	0.0	0.0	0.0
3	S.OSORIO13.8	373	1050.000	151.000	0.0	0.0	0.0
4	F.AREIA 13.8	381	1110.000	-10.800	0.0	0.0	0.0
5	S.SANTIA13.8	390	1325.000	-44.800	0.0	0.0	0.0
6	J.LAC.A 13.8	392	90.000	45.300	0.0	0.0	0.0
7	J.LAC.B 13.8	394	120.000	54.200	0.0	0.0	0.0
8	J.LAC.C 13.8	395	241.000	89.500	0.0	0.0	0.0
9	ITAUBA 13.8	407	490.000	87.600	0.0	0.0	0.0
10	SEGREDO 13.8	397	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	S.MATEUS 230	376	0.0	0.0	121.030	27.370	0.0
12	CUR.NORTE525	384	0.0	0.0	342.610	64.800	-150.000
13	BLUMENAU 525	385	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0
14	GRAVATAI 525	387	0.0	0.0	0.100	0.0	-150.000
15	V.AIRES 525	388	0.0	0.0	0.100	0.0	-150.000
16	PINHEIRO 525	389	0.0	0.0	0.100	0.0	-150.000
17	J.LACERDA138	393	0.0	0.0	117.310	37.040	0.0
18	P.BRANCO 230	372	0.0	0.0	42.820	13.680	0.0
19	FORQUILH1230	437	0.0	0.0	83.870	51.470	0.0
20	SIDEROPOL230	367	0.0	0.0	164.780	63.310	0.0
21	BARRACAO 525	386	0.0	0.0	161.950	-7.550	-100.000
22	SEGREDO 525	398	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0
23	AREIA 230	375	0.0	0.0	259.700	56.500	0.0
24	ITAUBA 230	408	0.0	0.0	376.120	144.300	0.0
25	LONDRINA 525	344	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0
26	CURITIBA 230	377	0.0	0.0	397.480	-23.270	0.0
27	JOINVILE 230	378	0.0	0.0	288.610	131.270	0.0
28	R.QUEIMAO230	380	0.0	0.0	108.920	49.430	0.0
29	CURITIBA 525	383	0.0	0.0	0.100	0.0	-150.000
30	S.SANTIAO525	391	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0
31	XANXERE 230	371	0.0	0.0	117.300	43.750	0.0
32	APUCARANA230	430	0.0	0.0	243.920	12.280	0.0
33	MARINGA 230	432	0.0	0.0	171.300	56.040	0.0
34	C.MOURAO 230	433	0.0	0.0	129.260	50.050	0.0
35	IVAIPORA 525	343	0.0	0.0	0.100	0.0	-200.000
36	BLUMENAU 230	379	0.0	0.0	394.740	84.340	0.0
37	FARROUPIL230	368	0.0	0.0	177.800	39.100	0.0
38	GRAVATAI 230	402	0.0	0.0	569.770	-423.600	0.0
39	LONDRINA 230	431	0.0	0.0	213.150	170.370	0.0
40	P.FUNDO 230	370	0.0	0.0	159.150	17.220	0.0
41	S.OSORIO 230	374	0.0	0.0	261.560	52.600	0.0
42	V.AIRES 230	414	0.0	0.0	365.830	-103.340	0.0
43	AREIA 525	382	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0
44	J.LACERDA230	396	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0
45	CECI 230	399	0.0	0.0	756.950	102.410	0.0

Tabela 4.18 - Condições de Operação para o Sistema de 10 Geradores

DADOS DE LINHAS E TRANSFORMADORES							
LINHA	DA BARRA INT	PARA BARRA INT	DA BARRA EXT	PARA BARRA EXT	RESISTENCIA SERIE POR CENTO	REATANCIA SERIE POR CENTO	CARREGAMENTO CAPACITIVO MVAR
1	1	21	366	386	0.0	1.360	0.0
2	2	40	369	370	0.0	4.600	0.0
3	3	41	373	374	0.0	1.140	0.0
4	4	43	381	382	0.0	0.670	0.0
5	5	30	390	391	0.0	1.140	0.0
6	6	17	392	393	0.0	8.710	0.0
7	7	44	394	396	0.0	7.010	0.0
8	8	44	395	396	0.0	4.500	0.0
9	9	24	407	408	0.0	2.360	0.0
10	10	22	397	398	0.0	0.680	0.0
11	21	14	386	387	0.210	3.090	371.830
12	43	21	382	386	0.140	1.950	229.680
13	40	31	370	371	1.630	8.350	14.400
14	40	31	370	371	1.630	8.350	14.400
15	37	40	368	370	4.630	23.780	40.840
16	37	40	368	370	4.630	23.780	40.840
17	24	40	370	408	2.500	15.480	46.900
18	31	41	371	374	3.160	16.210	27.840
19	18	41	372	374	1.530	8.610	13.440
20	41	23	374	375	3.060	15.230	27.020
21	41	34	374	433	3.440	17.600	30.400
22	41	34	374	433	3.440	17.600	30.400
23	43	29	382	383	0.190	2.800	335.760
24	43	12	382	384	0.190	2.740	328.670
25	43	22	382	398	0.050	0.700	83.920
26	35	43	343	382	0.180	2.270	227.210
27	14	30	389	391	0.140	1.950	239.700
28	35	30	343	391	0.140	2.040	244.750
29	30	22	391	398	0.050	0.700	83.920
30	23	11	375	376	2.450	12.560	20.410
31	11	26	376	377	0.880	4.150	52.110
32	26	27	377	378	1.820	9.350	15.950
33	26	27	377	378	1.820	9.350	15.950
34	27	36	378	379	1.540	7.760	13.500
35	27	36	378	379	1.540	7.760	13.500
36	36	28	379	380	2.160	11.050	18.630
37	36	28	379	380	2.160	11.050	18.630
38	28	44	380	396	1.800	9.200	15.530
39	28	44	380	396	1.800	9.200	15.530
40	29	12	383	384	0.050	0.690	82.160
41	29	13	383	385	0.120	1.750	209.700
42	31	18	371	372	1.630	8.350	14.400
43	15	16	388	389	0.220	3.000	383.000

Tabela 4.19 : Parâmetros de Linhas e Transformadores para o Sistema de 10 Geradores (base 100 MVA).

DADOS DE LINHAS E TRANSFORMADORES							
LINHA	DA BARRA INT	PARA BARRA INT	DA BARRA EXT	PARA BARRA EXT	RESISTENCIA SERIE POR CENTO	REACTANCIA SERIE POR CENTO	COMPENSAMENTO CAPACITIVO MVA
44	20	37	367	368	3.860	19.850	34.000
45	20	44	367	396	0.960	4.910	8.420
46	20	19	367	437	0.330	1.670	2.860
47	44	19	396	437	1.290	6.570	11.280
48	45	38	399	402	0.220	1.110	2.320
49	45	38	399	402	0.220	1.110	2.320
50	45	38	399	402	0.190	1.010	2.040
51	45	42	399	414	2.070	9.330	17.180
52	45	42	399	414	1.680	9.300	17.200
53	45	42	399	414	1.760	9.840	17.950
54	37	45	368	399	1.770	9.100	15.850
55	37	45	368	399	1.770	9.100	15.850
56	24	42	408	414	2.020	11.290	20.620
57	32	34	430	433	2.290	11.740	20.270
58	32	33	430	432	1.100	11.840	20.270
59	32	39	430	431	1.250	6.410	11.090
60	32	39	430	431	0.890	4.610	7.960
61	39	33	431	432	1.720	8.840	14.340
62	39	33	431	432	1.720	8.840	14.350
63	33	34	431	432	1.810	9.290	16.070
64	35	25	343	344	0.070	1.450	166.100
65	35	25	343	344	0.070	1.450	166.100
66	23	43	375	382	0.0	3.000	0.0
67	26	29	377	383	0.0	0.620	0.0
68	36	13	379	385	0.0	0.620	0.0
69	14	38	387	402	0.0	0.620	0.0
70	15	42	388	414	0.0	0.620	0.0
71	17	44	393	396	0.0	5.900	0.0
72	25	39	344	431	0.0	0.630	0.0

Continuação da Tabela 4.19

DADOS DOS ROTORES		
BARRA NUM. INT	BARRA NUM. EXT	REACTANCIA TRANSITORIA POR CENTO
1	366	3.676
2	369	10.390
3	373	2.840
4	381	2.410
5	390	2.430
6	392	13.520
7	394	15.340
8	395	8.000
9	407	4.320
10	397	2.160

Tabela 4.20 : Parâmetros dos Rotores para o Sistema de 10 Geradores (base 100 MVA)

LÍMITES DE GERAÇÃO E PENALIDADES DA FUNÇÃO
OBJETIVO DE GERAÇÃO E CARGA

BARRA NUM.	FMAX MW	FMIN MW	DELTA	RO	GAMA
1	1300.000	390.000	20.00	20.00	-
2	220.000	80.000	20.00	20.00	-
3	1100.000	650.000	20.00	20.00	-
4	1676.000	1000.000	20.00	20.00	-
5	1370.000	840.000	20.00	20.00	-
6	160.000	60.000	20.00	20.00	-
7	132.000	70.000	20.00	20.00	-
8	255.000	160.000	20.00	20.00	-
9	600.000	300.000	20.00	20.00	-
10	0.0	0.0	0.0	0.0	-
11	-	-	-	-	100.00
12	-	-	-	-	500.00
13	-	-	-	-	1000.00
14	-	-	-	-	1000.00
15	-	-	-	-	1000.00
16	-	-	-	-	1000.00
17	-	-	-	-	100.00
18	-	-	-	-	100.00
19	-	-	-	-	100.00
20	-	-	-	-	100.00
21	-	-	-	-	100.00
22	-	-	-	-	1000.00
23	-	-	-	-	100.00
24	-	-	-	-	500.00
25	-	-	-	-	1000.00
26	-	-	-	-	500.00
27	-	-	-	-	500.00
28	-	-	-	-	100.00
29	-	-	-	-	1000.00
30	-	-	-	-	1000.00
31	-	-	-	-	100.00
32	-	-	-	-	100.00
33	-	-	-	-	100.00
34	-	-	-	-	100.00
35	-	-	-	-	1000.00
36	-	-	-	-	500.00
37	-	-	-	-	100.00
38	-	-	-	-	500.00
39	-	-	-	-	100.00
40	-	-	-	-	100.00
41	-	-	-	-	100.00
42	-	-	-	-	100.00
43	-	-	-	-	1000.00
44	-	-	-	-	1000.00
45	-	-	-	-	100.00

Tabela 4.21 : Limites de Geração e Penalidades da Função Objetivo

4.4.1 - Análise de 5 Contingências

Neste exemplo testam-se 5 contingências (linhas 230 KV) e usa-se também um índice de estabilidade desejado igual a 0.93, diferente do fator de aceleração (FA) que é tomado igual

a 0,60. Com isso, na formulação do programa exige-se através do FA que o sistema tenha um índice de estabilidade menor ou igual a 0.60, ou seja uma segurança maior ou igual a 40%. A regra de parada para as iterações do algoritmo proposto será cumprida quando for obtido um índice de estabilidade igual a 0.07. Pede-se então mais segurança ao sistema exigindo-se mudanças maiores nas variações dos despachos a cada iteração e consequentemente maiores variações também nos índices de estabilidade calculado, podendo-se assim chegar-se mais rapidamente ao índice desejado, evitando-se com isso possíveis deficiências do algoritmo de programação linear.

Para este exemplo apresentou-se apenas o método dual, sendo que o primal, como já foi visto anteriormente, fornece solução igual ao dual.

Na tabela 4.22 mostraram-se os resultados dos despachos a cada iteração. Mostraram-se apenas os novos despachos para as barras de geração. Nas barras de carga não se observaram variações significativas.

Para a formação da tabela 4.23 que fornece os índices de estabilidade provenientes dos despachos resultantes a cada iteração, levou-se em conta o índice de estabilidade da contingência mais crítica que é a 19. Observou-se que foram necessárias 5 iterações para se alcançar o índice de estabilidade desejado.

Na tabela 4.24 mostra-se o ponto de operação final após 5 iterações. Obtêm-se a variação total de geração e variação de carga que não foi significativa.

Iteração Barras	INICIAL	1	2	3	4	5
Geração						
1	6.50	6.499	6.503	6.511	6.522	6.528
2	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15
3	10.5	10.468	10.434	10.402	10.402	10.402
4	11.1	11.099	11.099	11.099	11.099	11.099
5	13.25	13.249	13.249	13.249	13.249	13.249
6	0.9	0.937	0.969	0.995	1.051	1.079
7	1.2	1.2	1.2	1.208	1.208	1.264
8	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41
9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.838	4.753
10	9.211	9.197	9.185	9.173	9.162	9.150

Tabela 4.22 : Resultados dos Despachos a cada Iteração (pu) para o Exemplo de 10 Máquinas e 5 Contingências

Iteração	INICIAL	1	2	3	4	5
Índice de						
Estab. Calc.	1.268	1.167	1.084	1.018	0.966	0.929

Tabela 4.23 : Índices de Estabilidade provenientes dos Despachos Resultantes a cada Iteração para o Exemplo de 10 Máquinas e 5 Contingências

*** SISTEMA EXEMPLO 10 MAQUINAS 45 BARRAS 72 LINHAS ***
 BARRA DE FOLGA = 10
 INDICE DE ESTABILIDADE DESEJADO = 0.93
 FATOR DE ACCELERACAO = 0.60
 CONTINGENCIAS = 17 18 19 20 21
 PROGRAMACAO LINEAR COM USO DO METODO SIMPLEX DUAL

79

PONTO DE OPERACAO FINAL											
BARRA NUM. INT.	NOME	BARRA NUM. EXT.	GERACAO		CARGA		CAPACITOR OU REATOR	VARIACAO DE GERACAO		VARIACAO DE CARGA	
			ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR
1	BARRACAO 13.8	316	652.982	-26.230	0.0	0.0	0.0	2.982	0.0	0.0	0.0
2	P.FUNDO 13.8	369	215.000	70.700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	S.OSORIO 13.8	373	1030.924	151.000	0.0	0.0	0.0	-19.076	0.0	0.0	0.0
4	F.AREIA 13.8	311	1109.598	-10.800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	S.SANTIA 13.8	350	1324.593	-44.800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	J.LACERDA 13.8	352	108.713	45.300	0.0	0.0	0.0	18.713	0.0	0.0	0.0
7	J.LACERDA 13.8	314	120.000	54.200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	J.LACERDA 13.8	315	241.000	89.500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	ITAUBA 13.8	407	489.590	87.600	0.0	0.0	0.0	-0.010	0.0	0.0	0.0
10	SEGREDJ 13.8	317	914.399	289.821	0.0	0.0	0.0	914.399	239.821	0.0	0.0
11	S.MATEUS 230	376	0.0	0.0	121.029	27.369	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	CURMORTES 525	314	0.0	0.0	342.611	64.801	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
13	ELUMENAU 525	315	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	GRAVATAI 525	317	0.0	0.0	0.097	0.0	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
15	V.AIRES 525	318	0.0	0.0	0.096	0.0	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
16	PINHEIRO 525	319	0.0	0.0	0.090	0.0	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
17	J.LACERDA 13.8	353	0.0	0.0	117.310	37.040	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	P.BRANCO 230	372	0.0	0.0	42.333	13.699	0.0	0.0	0.0	0.013	0.019
19	FORQUILHA 230	417	0.0	0.0	83.873	51.473	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	SIDEROPL 230	317	0.0	0.0	164.781	63.311	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	BARRACAO 525	316	0.0	0.0	161.939	-7.550	-100.000	0.0	0.0	0.0	0.0
22	SEGREDJ 525	318	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	AREIA 230	375	0.0	0.0	256.695	56.495	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	ITAUBA 230	408	0.0	0.0	376.116	144.291	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	LCNDORINA 525	344	0.0	0.0	0.115	0.0	0.0	0.0	0.0	0.015	0.0
26	CURITIBA 230	377	0.0	0.0	397.430	-21.270	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	JCINVILE 230	378	0.0	0.0	288.609	131.267	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	P.QUEIMAD 230	310	0.0	0.0	108.921	49.431	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	CURITIBA 525	313	0.0	0.0	0.100	0.0	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
30	S.SANTIA 525	351	0.0	0.0	0.108	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	XANXERE 230	371	0.0	0.0	117.296	43.742	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	AFUCARANA 230	410	0.0	0.0	243.915	12.278	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	MARINGA 230	422	0.0	0.0	171.291	56.023	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.017
34	C.MOURAO 230	433	0.0	0.0	129.370	50.069	0.0	0.0	0.0	0.010	0.019
35	IVAIPORA 525	343	0.0	0.0	0.093	0.0	-200.000	0.0	0.0	0.0	0.0
36	ELUMENAU 230	379	0.0	0.0	394.740	84.340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	FARROUPIL 230	318	0.0	0.0	177.798	39.099	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	GRAVATAI 230	412	0.0	0.0	569.770	-423.598	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	LCNDORINA 230	431	0.0	0.0	213.147	170.355	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.015
40	P.FUNDO 230	370	0.0	0.0	159.155	17.222	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	S.OSORIO 230	374	0.0	0.0	261.559	52.600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	V.AIRES 230	414	0.0	0.0	365.830	-103.340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	AREIA 525	312	0.0	0.0	0.092	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	J.LACERDA 230	316	0.0	0.0	0.105	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	CECI 230	359	0.0	0.0	756.951	102.410	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabela 4.24 : Ponto de Operação Final para o Exemplo 10 Máquinas e 5 Iterações

4.4.2 - Análise de 10 Contingências

Para este exemplo foram testadas 10 contingências,

4 das quais são linhas de 525 KV (15-23-24-40) e o restante são de 230 KV.

Usou-se um fator de aceleração de 0.40 e o mesmo índice de estabilidade desejado do exemplo anterior igual a 0.93.

Na tabela 4.25 são mostrados os resultados dos despachos a cada iteração para todas as máquinas e somente para as cargas que apresentaram variações.

Na tabela 4.26 são vistos os índices de estabilidade provenientes dos despachos resultantes a cada iteração. Foram escolhidas 5 contingências, devido à dificuldade de se ressaltar a mais crítica, pois existe uma alternância desta de uma iteração para outra. Nota-se, para uma dada contingência, que de uma iteração para outra, a segurança pode melhorar ou piorar em relação à iteração anterior, ou melhor, um certo despacho pode ser melhor para determinadas contingências e pior para outras.

Finalmente, na tabela 4.27 tem-se o ponto final de operação, onde se observa que para se chegar ao índice de segurança, desejado para o sistema, foram necessárias variações significativas tanto na geração quanto na carga.

Iterações Barras	INICIAL	1	3	5	7	9	11
Geração							
1	6.50	6.50	6.61	6.71	6.55	6.58	6.64
2	2.15	2.15	2.15	2.15	2.16	1.81	1.68
3	10.50	10.50	10.35	10.19	9.66	9.66	9.33
4	11.10	11.10	11.10	11.10	11.35	11.35	11.35
5	13.25	12.27	12.27	11.72	11.71	11.71	11.71
6	0.90	1.34	1.47	1.79	1.84	1.76	1.51
7	1.20	1.20	1.26	1.27	1.29	1.20	1.20
8	2.41	2.4	2.52	2.53	2.53	2.52	2.53
9	4.90	4.89	4.89	4.89	4.89	4.89	3.73
10	9.21	9.15	9.09	9.02	9.03	8.99	9.57
Carga							
17	1.17	1.01	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
20	1.65	1.65	1.65	1.39	1.14	0.66	0.37
28	1.03	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
37	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78

Tabela 4.25 : Resultados dos Despachos a cada Iteração (pu) para o Exemplo 10 Máquinas e 10 Contingências

Conting. Iteração	15	18	19	23
INICIAL	2.75	1.05	1.27	3.71
1	2.34	0.60	0.73	2.16
3	1.50	0.97	1.19	0.31
5	1.30	2.31	2.85	0.18
7	1.23	12.51	16.11	0.17
9	1.05	0.28	0.34	0.16
11	0.52	0.51	0.62	0.16

Tabela 4.26 : Índices de Estabilidade Provenientes dos Despachos Resultantes a cada Iteração para o Exemplo de 10 Máquinas de 10 Contingências

*** SISTEMA EXEMPLO 10 MAQUINAS 45 BARRAS 72 LINHAS ***
 BARRA DE FOLGA = 10
 INDICE DE ESTABILIDADE DESEJADO = 0.93
 FATOR DE ACELERAÇÃO = 0.40
 CONTINGENCIAS = 15 18 19 20 23 24 31 33 38 40
 PROGRAMACAO LINEAR COM USO DO METODO SIMPLEX DUAL

PUNTO DE OPERACAO FINAL											
BARRA NUM. INT.	NOME	SAFRA NUM. EXT.	GERACAO		CARGA		CAPACITOR OU REATOR	VARIACAO DE GERACAO		VARIACAO DE CARGA	
			ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR
1	BARRACAO13.8	366	663.553	-26.200	0.0	0.0	0.0	13.553	0.0	0.0	0.0
2	P.FUNDO13.8	365	168.236	70.700	0.0	0.0	0.0	-48.764	0.0	0.0	0.0
3	S.OSORIO13.8	373	933.773	151.000	0.0	0.0	0.0	-110.227	0.0	0.0	0.0
4	P.AREIA13.8	361	1153.865	-10.800	0.0	0.0	0.0	25.800	0.0	0.0	0.0
5	S.SANTIA13.8	360	1171.867	-44.800	0.0	0.0	0.0	-153.133	0.0	0.0	0.0
6	J.LAC.A13.8	362	151.365	45.300	0.0	0.0	0.0	61.300	0.0	0.0	0.0
7	J.LAC.B13.8	364	120.429	54.200	0.0	0.0	0.0	0.429	0.0	0.0	0.0
8	J.LAC.C13.8	365	252.690	59.500	0.0	0.0	0.0	11.690	0.0	0.0	0.0
9	ITAUBA13.8	467	372.707	87.600	0.0	0.0	0.0	-117.293	0.0	0.0	0.0
10	SEGREGO13.8	367	957.076	230.227	0.0	0.0	0.0	957.076	230.227	0.0	0.0
11	S.MATOS230	376	0.0	0.0	121.030	27.369	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	CUR.NORTE325	364	0.0	0.0	342.613	64.805	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
13	ELUMENAU325	365	0.0	0.0	0.101	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	GRAVATAI325	367	0.0	0.0	0.398	0.0	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
15	V.AINES325	368	0.0	0.0	0.394	0.0	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
16	PINHEIRO325	369	0.0	0.0	0.396	0.0	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
17	J.LACERDA138	363	0.0	0.0	56.321	30.224	0.0	0.0	0.0	-21.239	6.815
18	P.BRANCO230	372	0.0	0.0	42.810	13.847	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.033
19	FORQUILH1230	467	0.0	0.0	83.372	51.475	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	SIDEROPOL230	367	0.0	0.0	36.907	11.417	0.0	0.0	0.0	-127.873	-51.893
21	BARRACAO325	366	0.0	0.0	158.296	7.343	-110.000	0.0	0.0	-3.694	0.293
22	SEGREGO325	368	0.0	0.0	0.101	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	AREIA230	375	0.0	0.0	255.700	50.501	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	ITAUBA230	468	0.0	0.0	376.127	144.322	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	LEONORINA325	344	0.0	0.0	0.106	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	CURITICA230	377	0.0	0.0	397.479	-23.270	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	JCINVIL230	378	0.0	0.0	288.510	151.263	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	R.GUILHAJ230	360	0.0	0.0	98.436	44.236	0.0	0.0	0.0	-10.484	-5.194
29	CURITICA325	363	0.0	0.0	0.069	0.0	-150.000	0.0	0.0	0.0	0.0
30	S.SANTIA325	361	0.0	0.0	0.110	0.0	0.0	0.0	0.0	0.010	0.0
31	XANXERO230	371	0.0	0.0	117.302	43.776	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	APUCARANA230	420	0.0	0.0	243.916	12.278	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	MARINGA230	422	0.0	0.0	171.296	50.325	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	C.MOURAO230	423	0.0	0.0	129.359	50.046	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	IVAIPORA325	343	0.0	0.0	0.113	0.0	-200.000	0.0	0.0	0.013	0.0
36	ELUMENAU230	379	0.0	0.0	394.740	64.341	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	FARRAPIL230	368	0.0	0.0	91.459	20.114	0.0	0.0	0.0	-66.341	-18.950
38	GRAVATAI230	402	0.0	0.0	569.770	-429.603	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	LEONORINA230	431	0.0	0.0	213.146	170.323	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	P.FUNDO230	370	0.0	0.0	159.159	17.230	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	S.OSORIO230	374	0.0	0.0	261.359	52.596	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	V.AINES230	414	0.0	0.0	365.328	-103.333	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	AREIA325	362	0.0	0.0	0.113	0.0	0.0	0.0	0.0	0.013	0.0
44	J.LACERDA230	356	0.0	0.0	0.100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	CECI230	369	0.0	0.0	756.948	102.408	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabela 4.27 : Ponto Final de Operação para o Exemplo de 10 Máquinas e 10 Contingências.

4.5 - Fator de Aceleração

Na tabela 4.28 apresentam-se as variações do índice de estabilidade, tempo computacional gasto em minutos e do número de iterações do algoritmo de análise de segurança, para chegar-se ao resultado proposto, em função do fator de aceleração (FA) usado.

Para apresentação desta tabela usou-se o exemplo de 10 máquinas, 5 contingências, índice de estabilidade desejado igual a 0.93 e fator de aceleração variável. O índice de estabilidade foi mostrado como sendo o índice da contingência mais crítica, a 19.

Observa-se na primeira linha da tabela 4.28, que usando-se um fator de aceleração igual ao índice de estabilidade desejado, no caso 0.93, em 20 iterações do algoritmo e gastando-se um tempo computacional de 40 minutos, o sistema ainda não atingiu o índice de estabilidade desejado.

Conforme vai se diminuindo o fator de aceleração o tempo computacional e o número de iterações também diminuem consideravelmente e o índice de estabilidade distancia-se cada vez mais do desejado, tornando o sistema ainda mais seguro. O fator de aceleração que fornece o índice mais próximo do desejado é o 0.60 com um tempo de 11 minutos e um número de iterações igual a 5. Mas levando-se em conta um bom tempo computacional, e sem fugir muito do índice desejado tem-se um fator de aceleração de 0.40.

FA	Índice Estab.	Tempo Comput. (mín.)	Número de Iter.
0.93	0.993	40	20
0.70	0.918	18	9
0.60	0.929	11	5
0.50	0.908	9	4
0.40	0.877	6	3
0.30	0.850	5	2
0.20	0.761	4	2

Tabela 4.28 : Variações do Índice de Estabilidade, do Tempo Computacional (minutos) e do Número de Iterações do Algoritmo Proposto em Função do Fator de Aceleração (FA).

4.6 - Comentários sobre os Resultados dos Métodos Primal e Dual

Como já foi mostrado nos exemplos anteriores, o ponto de operação encontrado usando o método de programação linear simplex primal é o mesmo que o encontrado usando o método dual. As etapas intermediárias também fornecem resultados iguais. Todos estes comentários eram de se esperar. A única diferença

entre os métodos está na ocupação de memória do computador.

Na tabela 4.29, mostra-se a relação do tempo computacional gasto nos métodos de programação linear simplex primal e dual.

O primeiro bloco da tabela apresenta a relação do tempo computacional para o exemplo 4.2, que tem 3 geradores, analisa 6 contingências, exige um índice de estabilidade de 0.70 e usa um fator de aceleração de 0.70. Pela tabela nota-se que o tempo computacional do primal é 11.37 segundos e o tempo do dual é 96% do tempo do primal, ou seja 7 segundos.

O segundo bloco apresenta a relação do tempo computacional para o exemplo 4.3, que tem 4 geradores, analisa 7 contingências e exige um índice de estabilidade de igual valor ao fator de aceleração, que é de 0.72. Nota-se que o tempo computacional do primal é 7.02 segundos e o do dual é 92% do tempo do primal, ou seja 6.43 segundos.

O terceiro bloco apresenta a relação para o exemplo 4.4.1, com 10 máquinas, analisa 5 contingências, usa um índice de estabilidade de 0.93 e um fator de aceleração de 0.60. Nota-se que o tempo computacional do primal é 13 minutos e o tempo gasto no método dual é 85% do tempo do primal, ou seja 11 minutos.

O último bloco apresenta a relação do tempo para o exemplo 4.4.2, analisa 10 contingências e usa um fator de aceleração de 0.40. Em 50 minutos de execução do algoritmo não chegou-se numa solução usando-se o método primal, mas com o método dual obteve-se um resultado em 36 minutos, portando o tempo computacional gasto pelo dual deverá ser no máximo 72% do tempo gasto pelo primal.

Portanto, conclui-se que a diferença entre os

tempos de ambos os métodos varia em função de vários fatores, por exemplo: número de máquinas, número de contingências analisadas, índice de estabilidade, fator de aceleração, carregamento inicial do sistema, etc. A diferença entre os tempos tende a crescer com o aumento do número de máquinas e do número de contingências analisadas.

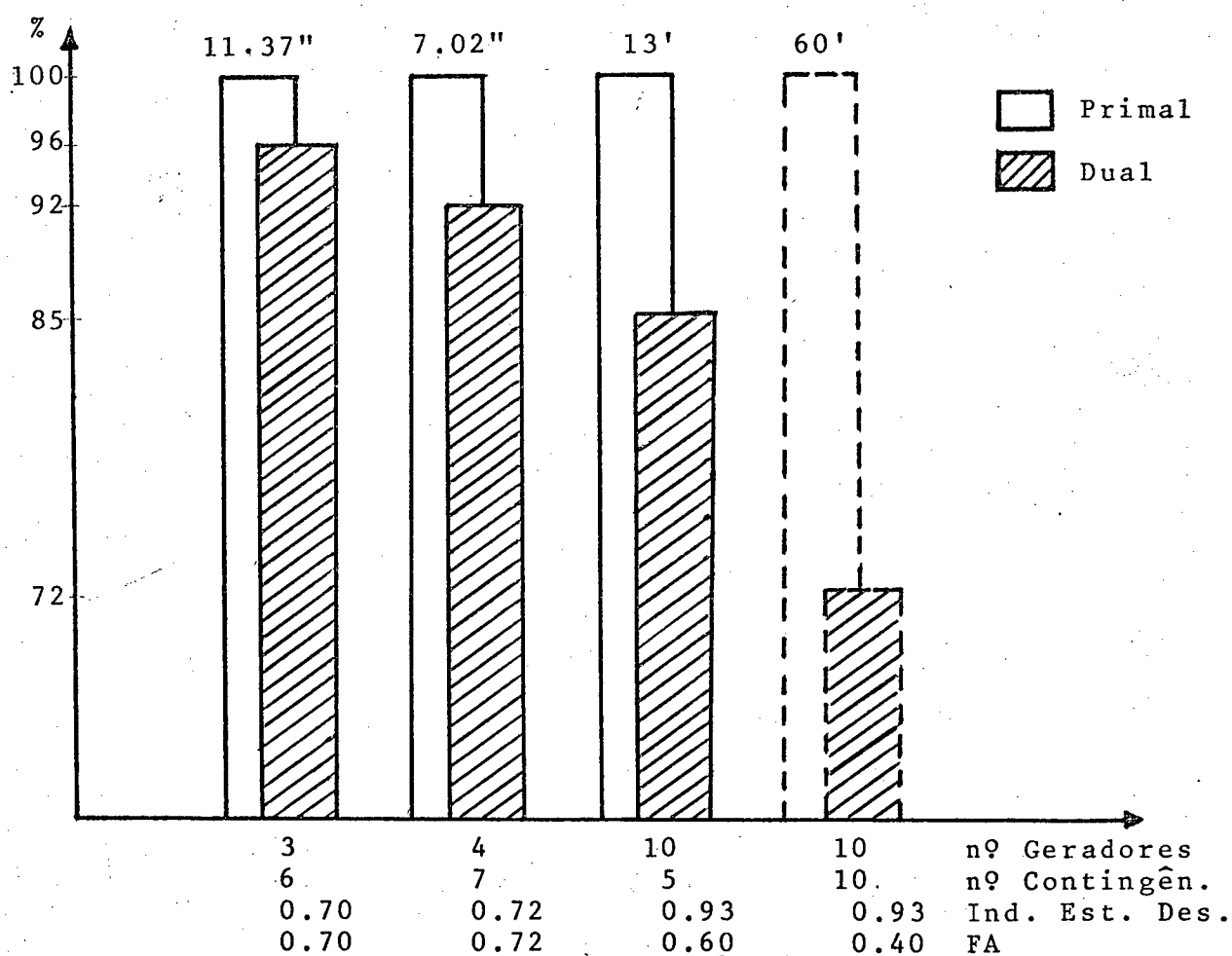


Tabela 4.29 : Relação entre o Tempo Computacional Gasto pelos Métodos Primal e Dual.

4.7 - Conclusões e Comentários

Neste capítulo foram apresentados alguns exemplos para a ilustração da utilização do algoritmo computacional proposto. Os primeiros exemplos, um de 3 e outro de 4 máquinas foram incluídos para a visualização dos resultados, tanto usando o método de programação linear simplex primal, quanto usando o método dual. Mostrou-se que a solução é a mesma fazendo-se uso de qualquer um dos métodos, o que varia é o tempo computacional e a eficiência do algoritmo de programação linear. O exemplo 3 fez uso de um sistema de 10 máquinas, 45 barras e 72 linhas, para o qual foram estudados dois casos: no primeiro foram analisadas 5 contingências (linhas de 230KV), usando-se um fator de aceleração de 0.6 e no segundo foram analisadas 10 contingências e com um fator de aceleração de 0.4. Ambos os casos exigem o mesmo índice de estabilidade, 0.93. Para o exemplo 3 foi testado apenas o método dual. Apresentou-se também a variação do tempo computacional em função do fator de aceleração. Nos 3 exemplos mencionados as sobrecargas do sistema foram eliminadas, como foi visto, através da realocação de geração e/ou alívio de carga.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 - Conclusões

Este trabalho teve como objetivo propor uma generalização de um algoritmo para melhoria da segurança, no sentido de permitir a consideração de restrições de estabilidade transitória correspondentes a um conjunto de contingências especificados que podem causar sobrecarga.

Originalmente o algoritmo básico [2] para este desenvolvimento considerava a formulação de um problema de programação linear, incluindo a análise de apenas uma contingência, de modo a realocar a geração e/ou cortar carga, para modificar o ponto de operação de modo a que possa pertencer ao domínio de estabilidade do ponto de equilíbrio pós-defeito.

Para a melhoria da segurança considerando diversas contingências, o número de restrições do problema de programação linear aumenta e, para sistemas de maior porte, apareceram dificuldades de convergência na aplicação do algoritmo proposto. Assim foi incluída uma formulação do problema considerando dualidade em programação linear. Desse modo, conforme discutido nos exemplos, houve sensível melhoria no tempo de processamento. Foi proposto também um fator de aceleração que contribui para melhorar a eficiência computacional, como mostrado nos exemplos, onde seu uso dimi

nui consideravelmente o número de iterações necessárias.

O algoritmo proposto considera análise em regime permanente, efetuada através de programas de fluxo de carga C.A. Nos casos em que não há convergência faz-se uso de análise de sensibilidade para estimar-se a solução via fluxo de carga linear.

As contingências são analisadas utilizando-se o segundo método de Liapunov, tomando-se para referência os despachos de geração fornecidos como solução de um problema de programação linear dual, correspondente à última iteração realizada.

Nos casos em que há corte de carga, deve-se alterar também a carga reativa, de modo a se manter a mesma proporcionalidade inicial. Isto é feito a cada iteração após solução do problema de programação linear e antes de se reavaliar o nível de segurança do sistema [2].

A utilização do fator de aceleração pode acarretar uma mudança no ponto de operação em relação ao ponto de operação obtido com o índice de estabilidade desejado e, conseqüentemente, alterar os resultados de ângulo do fluxo de carga final. Porém, esta modificação atua favoravelmente levando o ponto de operação mais para o interior da região de segurança e, portanto, atua no sentido da segurança.

Os exemplos apresentados ilustraram os problemas propostos.

5.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos

O algoritmo proposto neste trabalho apresentou soluções compatíveis e bom desempenho em relação ao tempo de processamento nos estudos realizados. Acredita-se, entretanto, que outras melhorias possam ser incorporadas. Neste sentido as sugestões que seguem podem ser relacionadas:

a) Utilização de técnicas de esparsidade, inclusive na formulação do problema de programação linear, através da qual obtém-se uma redução dos requisitos de memória, podendo assim o algoritmo ser aplicado a sistemas de grande porte.

b) Uso de métodos menos conservativos para o cálculo de domínios de estabilidade. Sugere-se o uso de conceitos de energia crítica e de Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) [22] , obtendo-se também com estes conceitos um aumento de rapidez computacional.

c) Inclusão de limites de tensão e reativos nas restrições do problema de programação linear.

A P Ê N D I C E A

MODELO DO SISTEMA

Utiliza-se o modelo clássico do sistema para análise da estabilidade via 2º método de Liapunov [2,4,5,6,10,13,14], no qual se faz uso de certas hipóteses simplificadoras abaixo citadas:

- A máquina síncrona é representada por uma fonte de tensão constante em série com sua reatância transitória de eixo direto. Para esta representação considera-se a máquina como sendo de rotor liso e que o enlace de fluxo do rotor permanece constante.

- A potência mecânica é considerada constante durante o período transitório, já os reguladores de velocidade, no período de estudo considerado, possuem constantes de tempo grandes comparadas com a duração do transitório.

- As constantes de inércia das máquinas serão consideradas como constantes.

- As potências de amortecimento são proporcionais às velocidades de escorregamento e as constantes de amortecimento das máquinas são supostas constantes.

- As cargas conectadas ao sistema são representadas por

admitâncias constantes, e pode-se então reduzir o sistema às suas barras internas de geração.

As equações diferenciais que descrevem o movimento dos ângulos dos rotores de n -máquinas interligadas [2,4,5,6] são:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d \delta_i}{dt} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} \left(\frac{d \delta_i}{dt} - \frac{d \delta_j}{dt} \right) + P_{e_i} - P_{m_i} = 0 \quad (A.1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

onde:

n - número de máquinas.

t - tempo.

δ_i - ângulo em graus elétricos entre o eixo do rotor da i -ésima máquina, medido em relação a um eixo girando à velocidade síncrona de referência.

M_i - constante de inércia da i -ésima máquina.

d_i - coeficiente de amortecimento da i -ésima máquina.

b_{ij} - constante de amortecimento assíncrono entre a i -ésima e j -ésima máquina. Em geral $b_{ij} = b_{ji}$.

P_{m_i} - potência mecânica de entrada ou saída da i -ésima máquina.

P_{e_i} - potência elétrica entregue ou recebida pela

i -ésima máquina.

No algoritmo de obtenção dos domínios de estabilidade são desprezadas as condutâncias de transferência do sistema reduzido, tendo-se então:

$$P_{e_i} = G_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (A.2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

onde:

E_i - tensão na barra i .

G_{ii} - condutância própria da i -ésima barra.

B_{ij} - susceptância de transferência entre a i -ésima e j -ésima barra.

Definem-se:

$$F_{ij} = E_i E_j B_{ij} \quad (A.3)$$

$$P_i = P_{m_i} - E_i^2 G_{ii} \quad (A.4)$$

onde:

F_{ij} - coeficiente de sincronização.

P_i - injeção de potência na barra i .

As variáveis δ_i e $\dot{\delta}_i$ são definidas como variáveis de estado:

tomando-se

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \dot{\delta}_i = \omega_i \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (A.5)$$

onde: ω_i - velocidade da i-ésima máquina relativa ao sistema de referência.

Tendo-se n-máquinas e amortecimento não uniforme $\frac{d_i}{M_i} \neq \frac{d_j}{M_j}$ são necessárias $(2n-1)$ variáveis de estado $|2, 3, 4|$.

Fixando-se um dos ângulos δ_n , como referência tem-se:

$$\alpha_i = \delta_i - \delta_n \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (A.6)$$

Obtém-se deste modo um sistema da forma:

$$\dot{\alpha}_i = \omega_i - \omega_n \quad i = 1, \dots, n-1.$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_i = M_i^{-1} \left[-d_i \omega_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} (\omega_i - \omega_j) P_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} \sin(\alpha_i - \alpha_j) + \right. \\ \left. - F_{in} \sin \alpha_i \right] \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (A.7)$$

Escrevendo-se $[\alpha^T \omega^T]^T$ como vetor de estado, as soluções de equilíbrio de (A.7) são da forma $[\alpha^e \omega^e]^T$ $\alpha^e \in \mathbb{R}^{n-1}$ e $\omega \in \mathbb{R}^n$

onde: índice e - refere-se ao equilíbrio

A estabilidade na origem de (A.7) é analisada transladando-se o equilíbrio para a origem, através da mudança de variáveis:

$$z_i = \alpha_i - \alpha_i^e$$

$$\dot{z}_i = \omega_i - \omega_n$$

$$i = 1, \dots, n-1.$$

$$\dot{\omega}_i = M_i^{-1} \left[-d_i \omega_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} (\omega_i - \omega_j) + f_i(P, F, Z + \alpha^e) \right] \quad (A.8)$$

$$i = 1, \dots, n.$$

A P Ê N D I C E B

DOMÍNIO DE ESTABILIDADE

A obtenção de um domínio de estabilidade para a origem de (A.8) é baseada no menor valor da energia potencial, calculada em pontos de tangência da superfície de nível da energia potencial com o politopo L_2 [1,2,3,4]. De forma geral o domínio de estabilidade pode ser obtido através da solução do problema de otimização abaixo:

$$\text{Min}_Z E_p(P, F, Z)$$

$$\text{s.a } Z \in \delta L_2 \quad (B.1)$$

onde δL_2 é a fronteira do conjunto L_2 que é formado por faces, as quais são subconjuntos contidos em hiperplanos de dimensão máxima no espaço de dimensão $n-1$, ou em intersecções de hiperplanos deste espaço vetorial.

A solução de (B.1) fornece um Z^* que especifica a tangência entre uma superfície de nível da função energia potencial e a fronteira de L_2 , de tal modo que o conjunto de nível correspondente esteja contido em L_2 e intercepte a fronteira δL_2 . Portanto, o domínio de estabilidade assintótica para a origem é dado como [2] :

$$D = \left\{ \begin{pmatrix} Z \\ \omega \end{pmatrix} / V(Z, \omega) \leq V(Z^*, 0) = E_p(F, P, Z^*) \right\} \quad (B.2)$$

O problema de otimização (B.1) pode ser colocado como [10] :

$$\text{Min}_k \{ \text{Min}_Z E_p(Z) \}$$

$$\text{s.a. } Z \in W_k \cap L_2 \quad (\text{B.3})$$

onde:

W_k - hiperplano que contém a k-ésima face de L_2 de dimensão máxima.

As faces $W_k \cap L_2$ do politopo são do tipo:

$$Z_k = z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e) = 0 \quad (\text{B.4})$$

$$Z_{kp} = z_k - z_p - (\pm \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e)) = 0 \quad (\text{B.5})$$

Mostra-se em [1] que a energia potencial E_p pode ser decomposta em parcelas do tipo:

$$g_k = F_{ij} [-\cos (Z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e - Z_{ij} \text{sen} \alpha_{ij}^e] \\ k=1,2,\dots,m. \quad (\text{B.6})$$

onde:

m - número de faces do politopo L_2

g_k - limite inferior de E_p e depende de Z_k ou $(Z_k - Z_p)$, na face correspondente

Pode-se decompor o problema de otimização (B.3), conforme se tenha um ou outro tipo de face, Z_k ou $(Z_k - Z_p)$ e a solução consiste em encontrar o mínimo entre os mínimos dos

subproblemas $|1,10|$, conforme colocado inicialmente

Para as faces do tipo Z_k , o subproblema fica:

$$\begin{aligned} \text{Min}_Z \quad & E_p(Z) \\ \text{s.a} \quad & z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e) = 0 \\ & Z \in L_2 \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

Com o uso do multiplicador de Lagrange, fica:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \{E_p(Z) + \lambda [z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e)]\} \\ \text{s.a} \quad & Z \in L_2 \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

Para as faces do tipo $(Z_k - Z_p)$, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Min}_Z \quad & E_p(Z) \\ \text{s.a} \quad & z_k - z_p - [\pm \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e)] = 0 \\ & Z \in L_2 \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

Com o uso do multiplicador de Lagrange, fica:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \{E_p(Z) + \lambda [z_k - z_p - (\pm \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e))]\} \\ \text{s.a} \quad & Z \in L_2 \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

A solução iterativa dos problemas de otimização

B.8 e B.10 pode ser obtida através do método de Newton-Raphson e usando-se $|2,10|$:

$$Z^{i+1} = Z^i - J^{-1}(Z^i) \nabla E(Z^i) \quad (B.11)$$

onde: $\nabla E(Z^i)$ - representa o valor do gradiente do Lagrangeano calculado no ponto Z do passo i .

$J^{-1}(Z^i)$ - é a inversa do Jacobiano calculada em Z^i $|2,4,6|$.

A P Ê N D I C E C

ALGORITMO PARA CÁLCULO DO EQUILÍBRIO PÓS-DEFEITO

Na determinação do ponto de equilíbrio pós-defeito, faz-se uso de análise de sensibilidade de sistemas lineares, de modo a obtê-lo a partir do ponto de equilíbrio antes do defeito, nos casos em que não se obtém convergência no fluxo de carga C.A. O algoritmo correspondente é apresentado abaixo:

Passo 1

Determinar o vetor \underline{w}_{kl} por um dos métodos dados a seguir:

- a) Resolver a equação:

$$B^0_{\underline{w}_{kl}} = \underline{e}_{kl} \quad (C.1)$$

utilizando-se os fatores triangulares de B^0

- b) Se a matriz inversa $Z^0 = [B^0]^{-1}$ for disponível, o vetor \underline{w}_{kl} é obtido diretamente pela diferença das colunas k e l .

Passo 2

Determinar o fator $e_{kl}^t Z^0 e_{kl}$ a partir do vetor W_{kl} obtido no passo 1:

$$e_{kl}^t Z^0 e_{kl} = e_{kl}^t W_{kl} = W_{kl}^k - W_{kl}^l \quad (C.2)$$

ou seja, este fator é dado pela diferença entre os elementos k e l do vetor W_{kl} .

Passo 3

Determinar $\Delta\theta$ através da expressão (2.5.17):

$$\Delta\theta = - \frac{\Delta\gamma_{kl} \theta_{kl}^0}{1 + e_{kl}^t Z^0 e_{kl} \Delta\gamma_{kl}} W_{kl} \quad (C.3)$$

Passo 4

Calcular os novos ângulos:

$$\theta = \theta^0 + \Delta\theta \quad (C.4)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - FONSECA, L.G.S. - "Determinação de Domínios de Estabilidade para uso em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência" - Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, 1976.
- [2] - MINUSSI, C.R. - "Realocação de Geração e Alívio de Carga para Eliminação de Sobrecargas considerando a Estabilidade Transitória e Programação Linear" - Tese de M.Sc., UFSC/SC, 1981.
- [3] - SAVI, T.D.S. - "Um Algoritmo para a Melhoria de Segurança em Problemas de Despacho Econômico" - Tese de M.Sc., UFSC/SC, 1981.
- [4] - COGO, J.R. - "Determinação de Domínios de Estabilidade para Sistemas de Potência com n-Máquinas" - Tese de M.Sc., UFSC/SC, 1977.
- [5] - FONSECA, L.G.S; MINUSSI, C.R. - "Melhoria da Segurança em Sistemas de Potência considerando a Estabilidade Transitória" - 4º Congresso Brasileiro de Automática - Campinas/SP, 1982.
- [6] - COLVARA, L.D. - "Planejamento do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica com Aplicação de Critério de Estabilidade Transitória de Liapunov" - Tese de M.Sc., UFSC/SC, 1981.

- [7] - ANDERSON, P.M.; FOUAD, A.A. - "Power Systems Control and Stability", Iowa State University Press, 1977.
- [8] - FONSECA L.G.S.; DORAIWAMI, R. - "A Fast and Reliable Determination of Dominion of Transient Stability for Multimachine Power Systems" - IEEE Conference paper A77629-9, July 1977.
- [9] - GLESS, G.E. - "Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power System Stability" - IEEE Trans. PAS., Vol. 85, Feb. 1966, pg. 159-168.
- [10] - MARQUES, G.B. - "Algoritmo Computacional para Análise de Estabilidade Transitória usando o Segundo Método de Liapunov" - Tese de M.Sc., UFSC/SC, 1981.
- [11] - MONTICELLI, A.J. - "Interactive Transmission Network Planning using a Least - Effort Criterion" - IEEE Trans. PAS., Vol. 101, October 1982, pg. 3919-3925.
- [12] - MONTICELLI, A.J. - "Análise Estática de Contingências em Sistemas de Energia Elétrica" - Tese de L.D., UNICAMP/SP, 1980.
- [13] - PAI, M.A. "POWER SYSTEMS STABILITY" Analysis by the Direct Method of Liapunov - Vol.. 3 North - Holland Publishing Company, 1981.
- [14] - KIMBARK, E.W. - "Power Systems Stability", Vol. I e II, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1948.

- [15] - EL-ABIAD, A.H.; NAGAPPAN, K. - "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems", IEEE Trans. PAS., Vol.85, nº 2, Feb. 1966, pg. 169-178.
- [16] - PRABHAKARA, F.S.; EL-ABIAD, A.H. - "A Simplified Detemination of Transient Stability Regions for Liapunov Methods", IEEE Trans. PAS., Vol. 94 , March/April 1975, pg. 672-689.
- [17] - WILLEMS, J.L. - "Stability Theory of Dynamical Systems", Thomas-Nelson and Sons, U.K., 1970.
- [18] - CHAN, S.M.; SCHWEPPE, F.C. - "A Generation Realocation and Load Shedding Algorithm" - IEEE Trans. PAS. , Vol 98, nº 1, Jan./Feb. 1979, pg 26-24.
- [19] - PUCCINI, A.L. - "Introdução à Programação Linear", Livros Técnicos e Científicos Editora, RJ, 1972.
- [20] - LUENBERGER, D.G. - " Introduction To Linear and Nonlinear Programming", Addison-Wesley Publishing Company, Inc, USA, 1973.
- [21] - HADLEY, G. - "Linear Programming", Addison-Wesley Publishing Company, Inc, USA, 1962.
- [22] - DECKER, I.C. - "Análise de EStabilidade Transitória em Sistemas de Potência usando o Conceito de Superficie Limite de Energia Potencial" - Tese de M.Sc., UFSC/SC, 1984.

- [23] - CHAN, S.M.; YIP, E. - "A solution of Transmission Limited Dispatch Problem by Sparse Linear Programming", IEEE Trans. PAS., Vol. 98, n° 3, May/June 1979, pg 1044-1033.
- [24] - G.KRON, DIAKOPTICS - "The Piecewise Solution of Large-Scale Systems" MacDonald, London, 1963.